

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Spolupráce trakční a energetické napájecí soustavy

Cooperation of Electric Railways and Power Supply System

2012

Martin Slivka

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Slivka**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Spolupráce trakční a energetické napájecí soustavy**
Cooperation of Electric Railways and Power Supply System

Zásady pro vypracování:

1. Elektrická vozba na Českých drahách
 2. Nesymetrie při napájení 1-fázových drah
 3. Měření ve vybrané transformovně
 4. Vyhodnocení měření
-
1. Electric Railways on Czech Railways
 2. Asymmetry by Supplying of AC Electric Railways
 3. Measurement in a Selected Traction Transformer Substation
 4. Evaluation of the Measurement

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TU Ostrava 2001, ISBN 80-78-791-0
- [2] Hořínek, P.: Resonance in power supply system of AC traction. In sborník WOFEX 2007, Ostrava:VŠB – TU Ostrava, 2007
- [3] Hlava, K.: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení, skripta DFJP Pardubice, 2004
Resonance in Electric Railways Power Supplying System
- [4] Biesenack,H.; Hofmann,G. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen, B.G. Taubner Verlag Wiesbaden 2006, ISBN 13 978-3-519-06249-3
- [5] Rusek, S.: Teoretická elektroenergetika, VŠB-TU Ostrava 1999
- [6] ČSN EN 5 160 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě (platná od 2000) a související normy a předpisy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

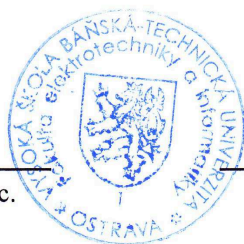
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.*

V Ostravě, dne 4.5.2012



Bc. Martin Slivka

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc. a Ing. Václavu Kolářovi, Ph.D., za odborné rady a konzultace k této diplomové práci.

Abstrakt

Diplomová práce popisuje vliv jednofázové elektrické vozby na napěťovou nesymetrii v energetické soustavě. Kapitola elektrické vozby na Českých drahách je věnována trakčním proudovým soustavám, trakčním napájecím stanicím a hnacím vozidlům. Další část práce se zabývá teoretickým rozбором nesymetrie metodou souměrných složek, jejím výpočtem a technickými prostředky pro zmírnění nesymetrie. Navazuje popis měření a popis elektrického zařízení v trakční transformovně. Následně je v práci uvedeno vyhodnocení naměřených hodnot. V závěrečné kapitole jsou shrnuty výsledky měření.

Klíčová slova

elektrická vozba, trakční napájecí stanice, trakční proudová soustava, metoda souměrných složek, napěťová nesymetrie

Abstract

This dissertation describes effects of one-phase railway engines on voltage asymmetry within a power distribution system. Chapter „Czech railways electric traction“ deals with traction distribution systems, its power supply and various kind of the engines themselves. Follows a theory describing asymmetry using the method of symmetric components, asymmetry analysis and some technical procedures for asymmetry elimination. The very next chapter pays attention to both traction transformer station arrangement and measurement done on it resulting in a final measure evaluation provided in the very last chapter.

Key Words

electric traction, traction distribution station, traction current system, method of symmetric components, voltage asymmetry

Seznam některých použitých symbolů a zkratk

ČD	České dráhy	
ČKD	Českomoravská Kolben-Daněk	
EMC	elektromagnetic compatibility – elektromagnetická kompatibilita	
FKZ	filtračně-kompenzační zařízení	
NN	nízké napětí	
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav	
ss	stejnoseměrný	
stř	střídavý	
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty	
TNS	trakční napájecí stanice	
TT	trakční transformovna	
UŽST	uzlová železniční stanice	
VN	vysoké napětí	
VVN	velmi vysoké napětí	
$\cos \varphi$	účinník	(-)
I	proud	(A)
S	zdánlivý výkon	(MV·A)
U	napětí	(V)
v_i	činitel proudové nevyváženosti	(-)
v_u	činitel napěťové nevyváženosti	(-)
ρ_i	činitel proudové nesymetrie	(-)
ρ_u	činitel napěťové nesymetrie	(-)

1.	ÚVOD	2
2.	ELEKTRICKÁ VOZBA NA ČESKÝCH DRAHÁCH	3
2.1.	ZÁKLADNÍ POJMY ELEKTRICKÉ VOZBY	3
2.2.	VÝZNAM ELEKTRICKÉ VOZBY	3
2.3.	TRAKČNÍ PROUDOVÉ SOUSTAVY	5
2.3.1.	<i>Charakteristika trakčních proudových soustav.....</i>	<i>6</i>
2.3.2.	<i>Styk dvou proudových soustav</i>	<i>8</i>
2.4.	TRAKČNÍ MĚNÍRNY	9
2.5.	TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY.....	11
2.6.	HNACÍ VOZIDLA S ELEKTRICKOU TRAKCÍ	13
3.	NESYMETRIE PŘI NAPÁJENÍ 1-FÁZOVÝCH DRAH.....	15
3.1.	TEORETICKÝ ROZBOR NESYMETRIE	16
3.1.1.	<i>Příčiny a důsledky nesymetrie.....</i>	<i>17</i>
3.1.2.	<i>Metoda souměrných složek</i>	<i>18</i>
3.1.3.	<i>Normativní dokumenty týkající se nesymetrie.....</i>	<i>21</i>
3.2.	VÝPOČET NESYMETRIE PŘI PROVOZU ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÝCH U SŽDC	23
3.2.1.	<i>Výpočet nesymetrie „T“ spojení</i>	<i>23</i>
3.2.2.	<i>Výpočet nesymetrie „V“ spojení.....</i>	<i>25</i>
3.3.	TECHNICKÉ PROSTŘEDKY PRO ZMÍRNĚNÍ NESYMETRIE	27
3.3.1.	<i>Symetrizační zařízení</i>	<i>28</i>
3.3.2.	<i>Speciální konstrukce transformátorů.....</i>	<i>30</i>
4.	MĚŘENÍ NA VYBRANÉ TRANSFORMOVNĚ.....	34
4.1.	ELEKTRICKÁ ČÁST TNS	34
4.1.1.	<i>Rozvod 110 kV.....</i>	<i>34</i>
4.1.2.	<i>Stanoviště trakčních transformátorů.....</i>	<i>35</i>
4.1.3.	<i>Rozvod 27 kV.....</i>	<i>36</i>
4.1.4.	<i>Filtračně kompenzační zařízení</i>	<i>37</i>
4.1.5.	<i>Vlastní spotřeba</i>	<i>38</i>
4.2.	MĚŘENÍ V TT BLANSKO.....	38
5.	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	40
5.1.	VYHODNOCENÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	41
5.2.	VYHODNOCENÍ NAPĚŤOVÉ NESYMETRIE.....	43
5.3.	VYHODNOCENÍ ÚČINÍKU	45
6.	ZÁVĚR.....	47
	BIBLIOGRAFICKÉ CITACE.....	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

1. Úvod

Střídavá elektrická vozba představuje významný jednofázový spotřebič, který je napájen z hladiny 110 kV. Vývoj a vznik proudové soustavy 25 kV, 50 Hz byl mimo jiné zdůvodňován jednoduchou konstrukcí napájecích bodů – trakčních transformoven. Trakční transformovna neobsahovala složitá zařízení, jako tomu bylo v případě měnících s rtuťovými usměrňovači. Tím bylo dosaženo větší spolehlivosti provozu. Výhody vyššího napájecího napětí střídavé trakční proudové soustavy se spatřovaly ve větší výkonové dimenzi, delší vzdálenosti napájecích bodů a v úspoře neželezných kovů. Jednofázová vozba tak představovala výhodnou alternativu stejnosměrné proudové soustavě o napětí 3 kV.

Pro připojení jednofázové vozby k elektrizační soustavě byl původně uplatňován jen požadavek, aby odebíraný trakční výkon nepřesáhl hranici 2 % zkratového výkonu. Postupem času docházelo ke zpřísňování požadavků na „kvalitu“ odběru. Zavedly se cenové přírážky za nedodržení účinnosti a za nevyžádanou kapacitní jalovou energii. Vzhledem k vysokému obsahu harmonických vyšších řádů pocházejících z hnacích vozidel a zavedením přísnějších norem bylo nutno později instalovat zařízení omezující vliv zpětného působení jednofázové vozby na kvalitu dodávané elektřiny jiným odběratelům. Proto byla v trakčních transformovnách instalována filtračně-kompenzační zařízení.

V této diplomové práci posuzuji vliv jednofázového trakčního odběru na trojfázovou energetickou napájecí soustavu z pohledu napětíové nesymetrie. Záměrem této práce bylo zhodnocení současného stavu vlivu trakční transformovny na napájecí síť, zhodnocení dodržování některých charakteristik kvality dodávané elektrické energie a uvedení přehledu možných technických řešení pro zmírnění nesymetrie.

Kapitola elektrické vozby na Českých drahách popisuje základní vlastnosti trakčních proudových soustav, jež se vyskytují v České republice. Taktéž je zde uveden význam elektrické vozby a jsou popsány základní konstrukční řešení trakčních napájecích stanic. V následující kapitole je probrán teoretický rozbor nesymetrie metodou souměrných složek, příčin a důsledků nesymetrie a pohledu závazných dokumentů na danou problematiku. Dále se zabývám výpočtem nesymetrie u provozovaných zařízení a shrnuji možná technická řešení pro zmírnění nesymetrie vzniklé jednofázovým odběrem.

Další kapitola je věnována měření v trakční transformovně Blansko a také je zde uveden popis elektrického vybavení trakční transformovny. V kapitole vyhodnocení měření se posuzují výsledky vyhodnocování napájecího napětí, nesymetrie a účinnosti z hodnot změřených v trakční transformovně.

2. Elektrická vozba na Českých drahách

2.1. Základní pojmy elektrické vozby

Elektrická trakce představuje pohon hnacího vozidla elektromotorem, který nazýváme trakční elektromotor. Trakční elektromotor může být napájen akumulátory nebo z trakčního vedení, což v případě kolejových drah dominuje [1]. U hnacích vozidel se závislou trakcí se elektrická energie pro pohyb vozidla přivádí trakčním vedením a sběračem do vozidla. Vozidla s nezávislou trakcí mají energii akumulovanou ve vhodné formě na vozidle a tuto energii si vezou s sebou. Do vozidel nezávislé trakce tedy můžeme řadit vozidla s pohonem spalovacími motory (dieselektrická) a akumulátory.

Elektrická vozba je provoz hnacích vozidel s elektrickou trakcí na drahách. Elektrickou vozbu je zpravidla možné provozovat pouze na tratích s trakčním vedením.

Elektrická vozidla jsou hnací vozidla s přívodem trakční elektrické energie přívodním vedením. Elektrickou trakci mají také vozidla s vlastním zdrojem elektrické energie.

Elektrické trakční zařízení je soubor speciálních silnoproudých prostředků, které svým provedením, konstrukcí, vlastnostmi a požadavky na obsluhu a údržbu slouží k napájení elektrické vozby. Elektrické trakční zařízení je nedílnou součástí elektrických drah a vozidel.

Trakční síť je elektrické trakční zařízení, které rozvádí trakční elektrickou energii pro pohon hnacího vozidla.

Trolejové vedení označuje vrchní vedení izolované od země a je představováno trolejovým drátem, zpětné vedení je představováno traťovými kolejnicemi. Z trolejového vedení odebírá hnací vozidlo elektrickou trakční energii sběračem. Toto vedení je napájeno z trakční napájecí stanice.

Trakční napájecí stanice jsou elektroenergetická zařízení, které slouží k dodávce trakčního proudu do trolejového vedení. Trakční napájecí stanice se dělí podle druhu trakční soustavy buď na měnící, ve kterých se stejnosměrný trakční proud získává transformací (z 22 kV, 50 Hz nebo 110 kV, 50 Hz) a následným usměrněním křemíkovými pastilkovými usměrňovacími diodami, nebo transformovny, ve kterých se získává jednofázový trakční proud transformací z rozvodné sítě 110 kV, 50 Hz.

2.2. Význam elektrické vozby

Na hlavních elektrizovaných tratích se významně projeví nárůst objemu přepravy vlivem vyšších rychlostí a větších hmotností vlaků, které nabízejí výkonnější elektrické lokomotivy. Vysoký hmotný výkon a větší výkonová přetížitelnost umožňuje zkrátit doby rozjezdů elektrických vlaků a spolu se zvýšenou dopravní rychlostí vlivem většího výkonu představuje elektrická trakce možnost pružnější dopravy ve srovnání s jinými typy trakcí. Zvýšení hmotného výkonu se patřičně projeví na tratích s větším sklonem.

Elektrické stroje se zpravidla vyznačují tím, že mají poměrně vysokou účinnost ve srovnání s jinými stroji. Tento jev je také pozorovatelný u elektrických lokomotiv.

Elektrické lokomotivy mají mnohem vyšší účinnost než lokomotivy s jiným typem trakce. Moderní elektrárny dávají možnost spalovat méněcenné uhlí za poměrně dobré účinnosti, jaderné elektrárny u nás mají po různých technických zlepšeních také vyhovující účinnost. Použitím elektrické vozby dochází ke zvýšení energetické efektivnosti. Ve spalovacích motorech dieselových lokomotiv se palivo nevyužije tak hospodárně, jako je tomu ve velkých elektrárenských kotlích, které jsou uzpůsobeny na maximální účinnost. Použitím elektrické vozby dochází ke snížení provozních nákladů na trakční energii, což dává možnost snížení přepravních cen a zvýšení tržeb dopravce. Nezanedbatelně se též projevují zvýšené proběhy elektrických lokomotiv, které ve srovnání s motorovými bývají využívány efektivněji. Elektrická vozba nabízí díky vysokým hmotným výkonům také snadnější zavádění provozu vysokých rychlostí, tedy rychlostí na $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. V posledních letech má také nezanedbatelný význam čistota provozu elektrické trakce. Nedochází ke znečišťování ovzduší výfukovými plyny podél tratí a ve stanicích, což se zvláště v období smogových situací projevuje příznivě. Cestující nejsou těmito plyny obtěžováni ani za horkých letních dnů, kdy bývají zpravidla otevřená okna v osobních vozech. Čistý vzduch nezanedbatelnou měrou přispívá k vyšší kultuře cestování. U provozu elektrické vozby odpadají obtíže spojené se zbrojením hnacích vozidel motorovou naftou (ve zvláštních případech uhlím a vodou u parní trakce). Použitím elektrodynamické brzdy dochází ke snížení opotřebení brzdových špalíků jak na hnacích vozidlech, tak na osobních vozech. Elektrodynamická brzda má výhodu ve větší brzdící schopnosti při vyšších rychlostech vlaků, kde již brzdné špalíky ztrácí účinek brždění. Brzdy s brzdovými špalíky se pak využívají při dobřďování neboli brždění z nízkých rychlostí, kde mají největší brzdňý účinek [2]. V poslední době se nabízí funkce centrálního vypnutí trakčníhó proudu z dispečinku při krizových dopravních situacích. Další možnou výhodu elektrického provozu představuje elektrické vytápění osobních vozů. V lokomotivách nemusí být umístěné parogenerátory či generátory elektrického proudu speciálně pro vytápění, jako tomu je u dieselové trakce. Motorové dieselové vozy zpravidla využívají k vytápění vlaků ohřáté chladicí vody od spalovacích motorů nebo zvláštní naftové topení.

Přestože se elektrický provoz na železnici jeví jako výhodný, vysoké investiční náklady brzdí další elektrizaci méně vytížených tratí. Návratnost v takových případech bývá dlouhá a proto je nutné elektrizaci pečlivě ekonomicky zvážít. K nevýhodám elektrického provozu na železnicích patří závislost dopravy na dodávkách elektrické energie. Výpadky trakčníhó proudu bývají způsobovány poruchami a údržbovými pracemi na trakčním vedení. Při údržbových pracích je možné u dvoukolejných tratí převést provoz na jednu kolej, což však klade větší nároky na provozování dopravy a snižuje propustnost tratí. Při proudové výluce obou kolejí nebo jednokolejného úseku je nutné na místech bez trakčníhó proudu přetahovat elektrické vlaky nezávislou trakcí, vyjma těch případů, kde jsou vlaky schopny přejet úsek výběhem. Napájení TNS je v 1. stupni dodávky elektrické energie. Tím jsou minimalizovány výpadky na napájecí straně TNS. Tento stupeň dodávky je nutný, protože při nečekaném výpadku může dojít k ohrožení lidských životů. Obtížnost elektrotechnických prací bývá často znepríjemněna hustým provozem a z toho následným zpožděním vlaků. Trakční vedení je snadno zranitelné při dopravních nehodách. Proto bývá nutné udržovat v UŽST motorové lokomotivy nezávislé

trakce. Obnovení elektrické vozby po nehodě bývá zpravidla zdlouhavější. Firmy provádějící práce na trakčním zařízení mají vždy lokomotivy nezávislé trakce. Elektrická vozba produkuje nerovnoměrné zatížení sítě v čase. Toto proměnlivé zatížení je charakteristickým rysem elektrické vozby, neboť největší potřeba energie bývá při rozjezdu vlaku na udělení kinetické energie. Při jízdě je odběr energie určen mechanickými ztrátami soupravy. Příkon pomocných pohonů bývá také proměnlivý, netvoří však příliš významný odběr oproti odběru pro trakční práci.

2.3. Trakční proudové soustavy

Během dlouhého vývoje elektrických trakčních proudových soustav se vystřídalo několik modifikací podle stupně vývoje silnoproudé elektrotechniky a elektroenergetiky. U nás jsou v provozu čtyři proudové soustavy, a to 1,5 kV ss, 15 kV, 16,7 Hz, 3 kV ss, 25 kV, 50 Hz, z nichž dominují poslední dvě.

František Křižík v roce 1902 zahájil elektrifikaci tratě Tábor - Bechyně proudovou soustavou 2 x 700 V ss, která měla uzemněný střed na kolejnici. Tato elektrizace byla úspěšně dokončena v roce 1903. Na Slovensku byla jako první elektrizována úzkorozchodná trať z Popradu do Starého Smokovce v roce 1908. Elektrizováno bylo proudovou soustavou 1,5 kV ss. Po 1. světové válce se ministerstvo železnic rozhodlo elektrizovat předměstskou dopravu v okolí Prahy. Elektrizace vycházela z inspirace ve Francii, a tak se pražský uzel elektrizoval soustavou 1,5 kV ss. Po 2. světové válce se rozhodlo elektrizovat trať Žilina – Spišská Nová Ves. Do provozu byla trať uvedena v roce 1956 a na některých místech byla konstruována na rychlost až $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Elektrizováno bylo soustavou 3 kV ss, se kterou byly v zahraničí již dostatečné zkušenosti. Neméně důležitým faktorem pro volbu této proudové soustavy byla schopnost tuzemského průmyslu vyrobit kvalitní a spolehlivé lokomotivy, které by splňovaly požadavky dostatečného výkonu a náročnosti provozu. Proti jednoduché konstrukci lokomotiv stála vysoká cena trakčních měníren. Z Prahy do České Třebové byla zahájena výstavba trakčního vedení systém 3 kV ss v roce 1951, o šest let později vyjel první zkušební vlak. Postupně byly tímto systémem elektrizovány tratě I. hlavního tahu bývalého Československa, Děčín, Praha, Kolín, Česká Třebová, Olomouc, Bohumín, Mosty u Jablunkova, Žilina, Poprad, Košice, Čierna nad Tisou a přilehlé tratě. V roce 1959 bylo rozhodnuto o elektrizaci tratě z Plzně do Babína, později do Horažďovic systémem 25 kV, 50 Hz. O dva roky později byl zprovozněn úsek o délce 20 km a v roce 1963 byl na této trati v celé délce zahájen elektrický provoz. Tímto systémem byla pak elektrizována jižní část republiky, Cheb, České Budějovice, Jihlava, Brno, Bratislava, Štúrovo a přilehlé tratě. Jedním z nepopíratelných důvodů elektrizace tímto systémem byla aktivita Škody Plzeň. Výrobce elektrických lokomotiv určených pro vývoz neměl dosud možnost vyzkoušení nových prototypů.

Po instalaci druhé proudové soustavy se naskytla otázka, jak v budoucnosti pokračovat v elektrizaci dalších tratí. V podstatě se naskytovaly dvě možnosti. Postupná přestavba stávající soustavy 3 kV ss na 25 kV, 50 Hz nebo připuštění existence obou proudových soustav, přičemž by se daly využít dvouproudové lokomotivy nebo by bylo nutné vybudovat stykové stanice.

Nakonec bylo přikročeno k zachování obou proudových soustav a k orientaci na dvouproudové lokomotivy.

2.3.1. Charakteristika trakčních proudových soustav

1,5 kV ss

Vlivem nepříliš vysokého napětí tečou při požadovaných trakčních výkonech relativně velké proudy. Z toho vyplývají zásadní nedostatky této proudové soustavy: průřezově velké trakční vedení, malá vzdálenost měníren, omezená výkonová použitelnost. Tak nízké napětí je spíše vhodné pro městské železnice než pro hlavní tratě. U této proudové soustavy jsou omezené možnosti zvyšování rychlosti, soustava není s to dávat požadované výkony pro náročnější provoz. Při vyšších rychlostech nastupují problémy s těžkým sběračem ve vztahu k mechanice vedení. Tento systém, podobně jako u městských železnic, není schopen rekuperovat energii na velké vzdálenosti. U městských železnic, kde vlaky jezdí nepříliš vysokou rychlostí a v krátkých časových intervalech, je pravděpodobnost odběru rekuperované energie vysoká. Zcela obráceně je tomu na hlavních tratích, kde projíždí vlaky jen občas. Na takových úsecích bývá zpravidla nutné mařit brzdou energii v brzdových odpornících. Výkup navrácené elektrické energie distributorem je výjimečný. Důvodem provozu této nevýhodné soustavy je udržování výchozího stavu, ve kterém jsou nahromaděny finanční prostředky. Při generálních opravách se elektrizuje soustavou zavedenou na okolních tratích. Vozidla této soustavy jsou jednoduchá a levná. V ČR je tato soustava použita na trati Tábor – Bechyně, kde byla přestavěna z původní Křižíkovy.

3 kV ss

Soustavu 3 kV ss lze kvalitativně hodnotit podobně jako předchozí, kvantitativně je na tom lépe úměrně vyššímu napětí. Dnešní moderní polovodičové prvky a způsob jejich řízení dovolují stavbu vozidel se střídači přímo napájenými z trakčního vedení. Tento způsob je výrobně i provozně hospodárnější, než dříve používané měniče. Elektrická výzbroj vozidel této soustavy je relativně lehká a prostorově nenáročná, proto je také relativně levná. Výkonovým limitem a hmotností sběrače systém 3 kV ss ještě vyhovuje nárokům na klasické evropské železnice do rychlosti $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Pro stavbu vysokorychlostních tratí jsou všeobecně preferovány soustavy s napětím 15 kV, 16,7 Hz a 25 kV, 50 Hz. Pravděpodobnost odběru rekuperované brzdové energie u těchto soustav je dobrá v husté příměstské dopravě a nepříliš dobrá v úsecích s dopravou řidší. Aby se zajistil odběr rekuperované energie u soustavy 3 kV ss i na větší vzdálenosti, povoluje příslušná norma krátkodobé zvýšení napětí v troleji až na 3900 V. U střídavých soustav není možné takovéto zvýšení napětí povolit s ohledem na přesycení transformátorů, kdy pak dochází k razantnímu nárůstu magnetizačního proudu. Soustava 3 kV ss je u provozovaných tratí běžně ponechávána, nově se však již příliš nerozšiřuje, kromě přílehlých tratí k této soustavě.

15 kV, 16,7 Hz

Názor na tuto soustavu se v posledních několika desetiletích měnil. Původně tato soustava byla budována především proto, aby došlo ke snížení transformačního napětí hlavních pólů

sériového motoru, čímž by se zlepšila komutace oproti použití kmitočtu 50 Hz. S příchodem polovodičových usměrňovačů a pozdějším nahrazením sériových strojů bezkomutátorovým pohonem s elektronicky řízenými střídači začala tato soustava ztrácet původní důvod svého zavedení. Výhoda této soustavy spočívá ve větší výkonové zatížitelnosti a ve větší vzdálenosti napájecích stanic, to je způsobeno dostatečně velkým napájecím napětím a malým úbytkem napětí na reaktanci vedení. Proto se hodí pro vysokorychlostní tratě. Obecně platnou nevýhodou soustavy 15 kV, 16,7 Hz je větší potřebný průřez jádra transformátoru než pro soustavu 25 kV, 50 Hz. Z toho vyplývá i větší hmotnost lokomotivního transformátoru, což při zavádění moderních nízkopodlažních souprav může být překážkou. V současné době jsou hledána nová technická řešení [3].

Polovodičová technika pronikla i do oblasti napájecích stanic. Rotační měniče dělící kmitočet 50 Hz třemi na 16 2/3 Hz byly nahrazeny polovodičovými s nesoudělným poměrem, které produkují kmitočet 16,7 Hz. Překvapivě výhodně se jeví popisovaná soustava při rekuperaci brzděné energie. V principu je to dáno průchodností trakční transformovny a vlastní jednofázovou sítí, která propojuje jednotlivé napájecí stanice. Tím se přenáší energie do dalších napájecích stanic a úseků, kde se spotřebovává. Snížený kmitočet také nezpůsobuje velký úbytek napětí na reaktanci vedení. Tato soustava je u nás na trati Znojmo – Šatov státní hranice.

25 kV, 50 Hz

Soustava 25 kV, 50 Hz má podobně jako předchozí soustava velkou zatížitelnost, proto se hodí pro vysokorychlostní tratě. Lehké trakční vedení, velká vzdálenost napájecích bodů a jednoduchá transformace napětí přímo z elektrovodné sítě jsou jen některé výhody této soustavy. V nynější době se soustava 25 kV, 50 Hz jeví jako nejperspektivnější. Již od doby vzniku soustavy se projevují dvě komplikace. Obě komplikace souvisí s využíváním distribuční sítě. Distribuční síť je třífázová, zatímco železnice potřebuje odběr jednofázový. To způsobuje nesymetrii v distribuční síti spolu s proměnlivým odběrem železnice. Takový odběr může způsobovat nižší kvalitu dodávané elektrické energie [4], čímž mohou vzniknout různé přírážky odběrateli za nedodržení kvality odběru. Distributor si tak kompenzuje vzniklé vícenáklady. Problém s nesymetrií lze řešit symetrizačním zařízením, které je však velmi nákladné vzhledem k požadovaným parametrům, nebo dostatečným zkratovým výkonem v místě odběru. Štěpení fází nelze vždy provést, protože distribuční síť bývá paprsková. Druhá komplikace souvisí s rekuperací energie. Ve stejnosměrných soustavách se energie nemůže vrátit přes trakční usměrňovač, avšak přes trakční transformátor je průchod neomezen, pokud nejsou použita zpětně wattová relé. Obvykle však distributor nestojí o rekuperovanou energii, protože nezná její velikost ani polohu v čase. Taktéž je zájem distributora jako prodejce energii prodávat a ne vykupovat.

Přehled mezí dovolených napětí v používaných soustavách je uveden v následující tabulce podle ČSN EN 50163 ed. 2 [5].

Tab. 2.1 Jmenovitá napětí, jejich přípustné mezní hodnoty a doby trvání

Trakční proudová soustava	Nejnižší krátkodobé (max. 2 min.) napětí (kV)	Nejnižší trvalé napětí (kV)	Jmenovité napětí (kV)	Nejvyšší trvalé napětí (kV)	Nejvyšší krátkodobé (max. 5 min.) napětí (kV)
1,5 kV ss	1	1	1,5	1,8	1,95
3 kV ss	2	2	3	3,6	3,9
15 kV, 16,7 Hz stř	11	12	15	17,25	18
25 kV, 50 Hz stř	17,5	19	25	27,5	29

2.3.2. Styk dvou proudových soustav

Při elektrizaci železnic se u nás nejvíce prosadily proudové soustavy 3 kV ss a 25 kV, 50 Hz. Zavedením druhé proudové soustavy vznikly problémy komplikující dopravu. Problematika styku dvou proudových soustav se netýká jen sousedních států, ale nastává i uvnitř státu, jsou-li zřízeny alespoň dvě proudové soustavy.

V praxi se problematika provozu styku dvou proudových soustav řeší několika způsoby.

S výměnou lokomotiv:

- elektrické lokomotivy se přetahují nezávislou trakcí,
- přepíná se trolejového vedení,
- použití dvouproudových lokomotiv pro malý přechod bez přepínání trolejového vedení.

Přetahování elektrických lokomotiv lokomotivami s nezávislou trakcí je časově značně náročné a zdržuje dopravu, což odporuje dnešním požadavkům zákazníků na rychlost přepravy. Navíc je nutná potřeba většího počtu provozních zaměstnanců, stejně jako je bezpodmínečná potřeba stálé pohotovosti lokomotivy nezávislé trakce.

Přepínáním trolejového vedení lze uskutečnit výměnu jednoproudových lokomotiv bez přetahů. Kolejiště a trolejové vedení musí být pro tento účel speciálně postavené kvůli zajištění bezpečné vazby kolejových cest, návěstidel a přepínání proudové soustavy v troleji. Toto řešení je značně nákladné. Přestože stanice s přepínáním trolejového vedení jsou investičně nákladnější než stanice používající pro styk přetahování lokomotiv, mají stanice s přepínáním trolejového vedení provozní výhody, protože postup při výměně lokomotiv je značně jednodušší než při přetahování. Veškerý pohyb lokomotiv je prováděn vlastní silou a není tudíž potřeba provozu nezávislé trakce. Z toho vyplývá také menší časová náročnost daného řešení a nižší potřeba provozních zaměstnanců než v předchozím případě.

Malým přechodem se rozumí dvouproudové lokomotivy, schopné jet na cizí proudové soustavě se sníženým výkonem, který je však postačující pro posun či pro odjezd lokomotivy s vlakem ze stanice. Lze jím poměrně jednoduše vyřešit daný problém, pokud není přídatné zařízení na lokomotivách příliš nákladné. Je sice třeba při použití takovýchto lokomotiv ve stanici provést výměnu, ale vlastní přechod mezi soustavami se děje na izolovaném úseku vedení. Izolovaný úsek vedení projíždí lokomotivy setrvačností. Tento způsob přechodu není u nás prakticky upotřebitelný.

Bez výměny lokomotiv:

- lze styk vyřešit použitím několikasytémové lokomotivy

Vícesystémové lokomotivy mají plný trakční výkon na všech soustavách. Tyto lokomotivy řeší styk proudových soustav přímo na vozidle pomocí moderních polovodičových prvků, jejichž cena neustále klesá. Sтык bývá proveden na širé trati, kde proudové soustavy od sebe odděluje izolovaný, beznapěťový úsek. Izolovaný úsek projíždí lokomotiva se staženými sběrači setrvačností a v mezičase se přepíná na novou proudovou soustavu. Některé lokomotivy jsou schopny samy rozpoznat danou proudovou soustavu. Aplikace výkonové elektroniky na lokomotivách řeší problémy s různými proudovými soustavami a jejich styk. Použitím těchto lokomotiv přestává být problém styku proudových soustav z pohledu plynulosti dopravy aktuálním. Vlivem vysokých investovaných finančních prostředků ve starších typech lokomotiv bude zatím i nadále docházet v některých případech ke komplikacím. Jednosystémové lokomotivy je snaha provozovat na dopravních výkonech, kde nedochází ke styku.

V ČR je sedm míst styku proudových soustav 25 kV, 50 Hz a 3 kV ss.

2.4. Trakční měnírny

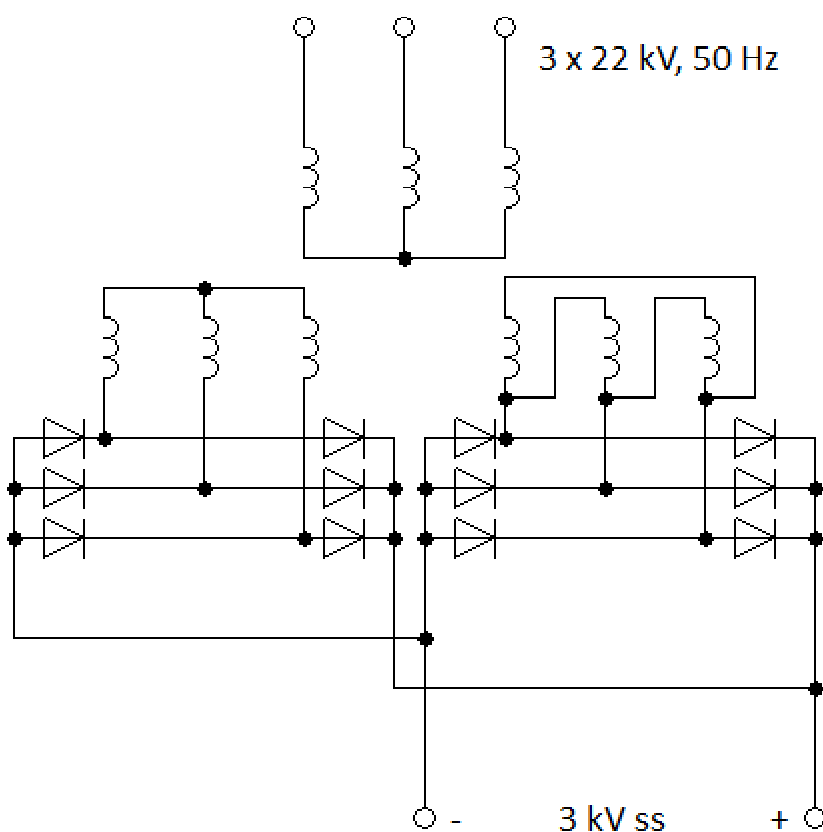
Trakční měnírny jsou trakční napájecí stanice, v nichž dochází k přeměně střídavého napětí 3 x 22 kV, 50 Hz na 3 kV ss. Toto napětí je dále rozváděno trakční sítí k místu spotřeby, tj. k hnacím vozidlům. Trakční měnírna je napájena z distribuční sítě buď z napětí 22 kV nebo z napětí 110 kV, které se pak transformuje na napětí 22 kV. Z napětí 22 kV jsou napájeny usměrňovačové transformátory se sekundárním napětím 2500 V. Může se zdát, že transformace 110/22 kV je zbytečná, zkušenosti však potvrdily pravý opak [6]. Při přímé transformaci bez mezinapětí 22 kV jsou mnohem větší zkratové proudy, jejichž vypínání je překážkou. V minulosti se zkoušela transformace bez mezinapětí s cílem ušetření barevných kovů i investičních nákladů. Při zkoušce se projevíly negativní vlastnosti tohoto uspořádání, také byla potíže s napájením vlastní spotřeby ze sítě 110 kV. Nakonec se od zmíněného řešení upustilo (Košťov u Ústí nad Labem).

V měnících bývá také vývod pro napájení zabezpečovacího zařízení, často je použito napětí 3x 6 kV, 50 Hz, nověji se používá 3x 22 kV, 50 Hz. Napětí 6 kV se získává transformací buď z 22 kV, nebo transformací trojvinutovým transformátorem 110/22/6 kV. Výkon transformátoru 110/22 kV bývá 10 MV·A.

Napájení trakčních měníren musí být provedeno ze dvou na sobě nezávislých zdrojů, protože se jedná o zařízení prvního stupně dodávky elektrické energie. Proto i transformátory 110/22 kV musí být dva a musí být plně zálohovatelné.

Usměrňovačových jednotek bývá v měnárnách několik. Tyto jednotky jsou zapojeny paralelně přes rychlovypínače a odpojovače na jednu omezovací tlumivku o indukčnosti 5 mH. Tato tlumivka je instalována na záporném pólu zdroje a slouží k omezení strmosti nárůstu zkratového proudu.

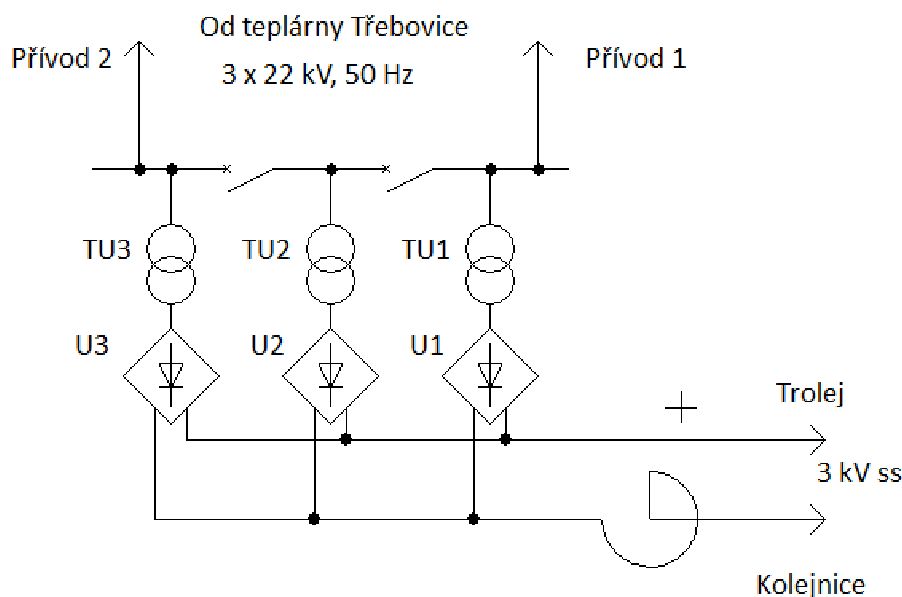
Usměrňovačová jednotka je tvořena transformátorem a usměrňovačem. Transformátor je trojvinutový Yyn0d1 s transformačním poměrem 23000/2500 V. Napětí nakrátko na obou sekundárních vinutích je přibližně 7,5 %. Tyto transformátory se v současné době vyrábí jako suché s přirozeným chlazením a s možností nuceného chlazení ofukováním ventilátory. Usměrňovač je řešen jako dva paralelně pracující šestipulzní usměrňovače, z nichž jeden je připojen na hvězdu a druhý na trojúhelník sekundárního vinutí transformátoru. Vlivem fázového posunutí napětí mezi hvězdou a trojúhelníkem o 1 hodinu (30° elektrických) dojde k sečení pulsů a tím se dostane dvanáctipulzní usměrnění. Schéma takového zapojení je na *obr. 2.1*.



Obr. 2.1 Schéma zapojení dvanáctipulzního usměrňovače trakční měnírny

Vlastní spotřeba měnírny je řešena dvěma transformátory 22/0,4 kV. Transformátory mají výkon zpravidla 160 kV·A a jsou oba plně zálohovatelné.

Průměrná vzdálenost mezi jednotlivými napájecími stanicemi u SŽDC je 20 km. Zjednodušené schéma zapojení TNS Ostrava-Svinov je na *obr. 2.2*.



Obr. 2.2 Zjednodušené schéma zapojení TNS Ostrava Svinov

2.5. Trakční transformovny

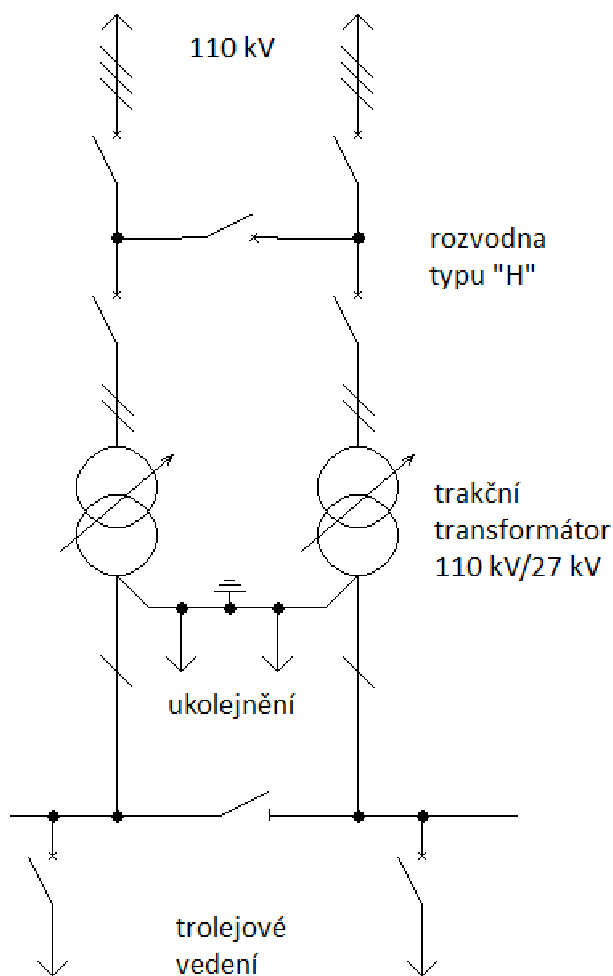
Trakční transformovny bývají umístěny v těsné blízkosti železničních stanic, kde je možnost vyvést vlečku potřebnou pro dopravu trakčních transformátorů. Napájení je řešeno dvěma nezávislými přívodními vedeními distribuční sítě 110 kV. Rozvodna 110 kV je buď venkovní nebo zapouzdřená SF₆. Zpravidla se jedná o rozvodnu typu „H“. Často se používá dvou transformátorů zapojených do „V“ nebo jednoho transformátoru zapojeného do „T“. Zapojení transformátoru do „T“ přichází v úvahu na méně vytížených železničních tratích. Druhý transformátor pak slouží jako záloha.

V trakční transformovně jsou zpravidla dva jednofázové olejové transformátory 110/27 kV [7,8]. Tyto transformátory jsou výkonově nadimenzovány tak, že tvoří plnou vzájemnou rezervu. Transformátory jsou na straně 110 kV regulovatelné v rozsahu $\pm 8 \times 2 \%$. Tím je možno vyrovnat změny napětí v síti 110 kV a udržovat trakční napětí na jmenovité úrovni 27 kV. Od transformátorů se požaduje značně velká zkratová odolnost, neboť jsou tyto transformátory připojeny na napětí 110 kV, kde zkratové výkony dosahují řádu tisíců MV·A. S přihlédnutím k železničnímu provozu, kde se dá předpokládat větší počet zkratů než v energetice, jsou trakční transformátory konstruovány jako zkratuvzdorné. Taktéž od transformátorů se požaduje značná výkonová přetížitelnost, podmíněná proměnlivým odběrem železniční dopravy. U transformátorů na SŽDC je tento požadavek stanoven 200 % přetížení po dobu 2 minut. U SŽDC se v podstatě používá třech typů trakčních transformátorů a to EJRH 6989/71 s výkonem 6,5 MV·A/10 MV·A, EJRE 7491/75 s výkonem

10 MV·A/13,3 MV·A a EJRH 28 M-0 s výkonem 10 MV·A/12,5 MV·A. Výkon před lomítkem označuje bez ofukování, za lomítkem s ofukováním. Jedná se o provedení ONAN/ONAF. Napětí nakrátko je 10 % nebo 12,5 %.

Ke každé trakční transformovně přísluší filtračně kompenzační zařízení. To je nutné z hlediska dodržení předepsaného účinníku a výskytu harmonických vyšších řádů. Problematiku řeší norma ČSN EN 50160 ed. 3, soubor norem PNE 33 3430 a dokument Pravidla provozování distribučních soustav. Norma ČSN EN 50160 ed. 3 nově řeší problematiku kvality elektrické energie v článku 6 této normy do napětí 150 kV. Při nedodržování kvality odebírané elektrické energie uplatňuje distributor finanční postihy, což ve výsledku zdražuje elektrickou energii. Proto je také zájem odběratele se těmito postihům pokud možno vyhnout. Filtračně kompenzační zařízení se připojuje na napětí 27 kV, případně na napětí 5 kV, které je sníženo transformátorem k tomuto účelu zvláště postaveným. Napětí 5 kV je použito z důvodu nedostatečného blokovacího a závěrného napětí starších polovodičových prvků. Harmonické 3. a 5. řádu mívají největší amplitudy. Průměrná vzdálenost mezi napájecími stanicemi je u SŽDC 42 km.

Zjednodušené schéma rozvodny trakční transformovny je na *obrázku 2.3*.



Obr. 2.3 Zjednodušené schéma zapojení trakční transformovny

2.6. *Hnací vozidla s elektrickou trakcí*

V počátcích soustavné elektrizace v Československu byla jedna z prvních používaných řad lokomotiv E499, dnešní označení řady 140. Byla to první lokomotiva vyvinuta ve spolupráci se Švýcarskem a vyrobena ve Škodě Plzni, určená pro traťové výkony na systému 3 kV ss [9]. Lokomotiva je skříňová, podvozková se dvěma stanovišti, které jsou od sebe odděleny strojovnou. Pojezdovou část tvoří dva dvounápravové podvozky vyrobené v licenci firmy SLM. Valivý pohyb dvojkolí umožňují dvouřadá naklápěcí ložiska. Vypružení dvojkolí je řešeno pomocí šroubových pružin, vypružení skříně a podvozku je provedeno listovými pružinami. Nápravy jsou hnány individuálně čtyřmi trakčními motory. Kroutící moment z motorů je na dvojkolí přenášen pomocí pružné lamelové spojky a převodovky s převodovým poměrem 1:2,27. Podvozky jsou vybaveny zařízením vyrovnávající mezinápravové tlaky a mezipodvozkovou vazbou, která snižuje kvazistatické síly při průjezdu lokomotivy obloukem. Elektrická část lokomotivy je tvořena vysokonapětovými silovými obvody napájenými z troleje. Řídící obvody jsou napájeny z akumulátorové baterie o napětí 48 V. Rozjezdový odporník je sestaven z dvaceti litinových článků a nachází se na střeše mezi dvěma trolejovými sběrači. Chlazení rozjezdových odporníků a trakčních motorů je vyřešeno dvěma sériově zapojenými ventilátory. Regulace lokomotivy je odporová s nepřímým řízením a hlavní kontrolér je poháněn pneumotorem. Řazení trakčních motorů je buď sériově nebo paralelní ve dvou větvích, kde jednu větev tvoří dva sériově zapojené motory. Lokomotiva je vybavena několika brzdami, brzdou tlakovou samočinnou, přídatnou a ruční. Každý podvozek je vybaven dvěma brzdovými válci.

Řada lokomotiv 141 (E499.1) byla odvozena od řady 140 stejně jako několik dalších řad. Měla jistá vylepšení týkající se podvozku oproti předchozí řadě. Karosování bylo podobné a mírně zjednodušené.

Obě řady lokomotiv se hojně vyvážely do zahraničí, kde o ně byl zájem. Provozní spolehlivost těchto lokomotiv byla až po úpravách výborná, u řady 141 byly problémy s podvozkem, který prodělal několik úprav. V 90. letech minulého století se obě tyto řady začaly nahrazovat modernějšími lokomotivami. Rušily se především lokomotivy řady 140 a po roce 2000 jich u ČD mnoho nezůstalo. Dnes se tyto lokomotivy používají jako provozní záloha. Maximální rychlost těchto lokomotiv je $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

V padesátých a šedesátých letech po nasazení lokomotiv řady 140 a 141 se ukázala výhodnost trakčních charakteristik pro rychlíkovou vozbu, kdežto pro vozbu těžkých nákladních vlaků se trakční charakteristiky nejevily moc výhodné. Tažná síla pro těžké nákladní vlaky u tohoto typu lokomotivy nebyla dostačující a byla vyvinuta řada 121. O desetiletí později byly potřebné další nákladní lokomotivy a tak úpravou řady 121 vznikly řady 122 a 123. Řada 121 je již dnes zrušená. Maximální rychlost těchto hnacích vozidel je $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a provozně slouží pro dopravu uhlí v severočeských uhelných pánvích.

V padesátých letech byl také pro těžkou nákladní dopravu zadán vývoj šestinápravové lokomotivy a tak vznikly řady 180 a 181. V pozdějších letech při další potřebě nákladních lokomotiv byly odvozeny řady 182 a 183. Lokomotivy řad 182 a 183 se v početnějším množství vyskytují v provozním stavu.

Další řadou univerzálních lokomotiv provozovaných na tratích SŽDC je řada 130. Maximální rychlost dosahuje 100 km h^{-1} .

Pro vozbu těžkých rychlíků byla vyvinuta řada 150, protože řada 140 již nedostačovala svým výkonem. Výkon této řady je 4000 kW. Maximální rychlost je v současné době u řady 150 140 km h^{-1} a u řady 151 160 km h^{-1} .

Všechny zatím uvedené řady se vyznačují tím, že regulace výkonu a rychlosti lokomotiv je provedena odporníky a přepínáním skupin trakčních motorů. Rozjezd přes odporníky způsobuje na odpornících úbytek napětí a vlivem procházejícího proudu dochází ke ztrátám výkonu, který se mění v teplo. Proto se říká rozjezdovým stupňům se sériově zapojenými odporníky stupně ztrátové. Jako jízdní nebo bezztrátové stupně se označují také stupně, kdy je sériový odporník vyřazen a regulace se provádí změnou šuntovacích odporníků. U těchto řad jsou použity stejnosměrné motory se sériovým buzením.

Pro střídavou trakci 25 kV, 50 Hz byla jako první nasazená ve větším měřítku řada 230 (E479, později označované jako S479) s maximální rychlosti 110 km h^{-1} . U této řady je trakční proud veden přes trakční transformátor, kde se na primární straně změnou odboček reguluje výkon lokomotivy. Následně je trakční proud usměrněn a vyfiltrován tlumivkou. Tímto proudem se napájejí trakční motory. V pozdějších letech při potřebě dalších lokomotiv byly odvozeny od předchozího typu řady 240 a 242 s maximální rychlostí 120 km h^{-1} .

Nejpočetnější skupinou dvousystémových lokomotiv na tratích SŽDC tvoří řada 363. Plzeňská Škoda a závod ČKD Elektrotechnika spolupracovaly na vývoji této lokomotivy, která byla na svou dobu vzniku velmi moderně řešena. Tyto univerzální lokomotivy tzv. druhé generace se ukázaly jako velice provozně spolehlivé. Řízení výkonu a rychlosti lokomotivy je provedeno tyristorovými pulzními měniči. Toto řešení je velice hospodárné, neboť nedochází při rozjezdu ke ztrátám výkonu na odpornících. Při napájení lokomotivy z proudové soustavy 3 kV ss je trakční proud veden přes oddělovací tlumivku na pulzní měniče, při napájení ze soustavy 25 kV, 50 Hz je trakční proud veden přes snižovací transformátor a usměrňovač. Usměrněné napětí 3000 V je připojeno na pulzní měniče. Pulzní měniče napájí čtyři trakční cize buzené motory. Lokomotiva dosahuje maximální rychlosti 120 km h^{-1} , upravená verze 362 je osazena jinou převodovkou a dosahuje maximální rychlosti 140 km h^{-1} .

Z řady 363 byly odvozeny řady 163 a 263, které byly upraveny tak, že byly vypuštěny části pro druhou proudovou soustavu. Zavedením těchto jednosystémových lokomotiv se sledovala unifikace náhradních dílů s řadou 363. Řada 163 postupně nahrazovala dosluhující řady 140 a 141.

V roce 2002 České dráhy rozhodly o objednávkě dvaceti třísystémových lokomotiv. Výběrové řízení vyhrála firma ŠKODA Dopravní Technika. V současné době probíhá zkušební provoz na osobních vlacích. Pohon lokomotivy je řešen asynchronními motory, stejně jsou řešeny i pomocné pohony. Střídavý trakční proud je transformován na nižší napětí a poté usměrněn. Proud ze soustavy 3 kV ss je veden přes vinutí transformátoru, který se na tomto systému využívá jako tlumivka, přímo do stejnosměrného meziobvodu trakčního měniče. Trakční měnič napájí trakční asynchronní motory. Lokomotivy jsou koncipovány jako univerzální pro osobní a nákladní dopravu. Maximální rychlost je 200 km h^{-1} .

3. Nesymetrie při napájení 1-fázových drah

Klasická elektroenergetika používá pro výrobu, přenos a distribuci trojfázovou soustavu. Ideální trojfázová soustava má tu vlastnost, že při použití tří vodičů dokáže vytvořit kruhové točivé magnetické pole a libovolnou jednou záměnou dvou fází lze obrátit smysl točení. Součet okamžitých výkonů všech tří fází je konstantní, kdežto okamžité výkony každé fáze mají periodicky měnící se průběh. Tyto velice výhodné vlastnosti způsobily, že se trojfázová soustava téměř všude rozšířila. Konstrukce elektrických strojů při použití této souměrné soustavy vycházejí příznivě. Tři samostatné, elektricky oddělené zdroje, se nacházejí v jednom konstrukčním celku. Všechny tři zdroje mají stejnou velikost efektivního napětí a jsou vůči sobě fázově posunuty zpravidla o úhel $\alpha = 4\pi/3$. Přenos elektrické energie lze uskutečnit jen s pomocí tří vodičů, což je značná úspora na materiálu vedení. Z principu funkce trojfázové soustavy vyplývá, že ideálních parametrů výroby, přenosu a spotřeby dosáhneme, bude-li trojfázová zcela symetrická, viz *obr. 3.1*.

Pro okamžité hodnoty v soustavě platí:

$$\begin{aligned}u_A(t) &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \\u_B(t) &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2}{3}\pi + \varphi\right) \\u_C(t) &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2}{3}\pi + \varphi\right)\end{aligned}\tag{3.1}$$

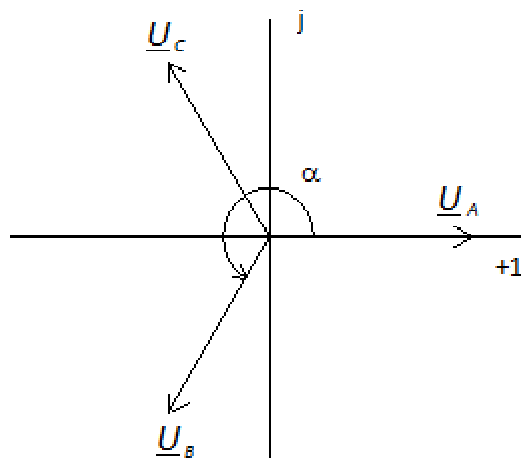
Fázory napětí jednotlivých fází jsou dány rovnicemi:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= U \cdot e^{j0} \\ \underline{U}_B &= U \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \underline{U}_C &= U \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Jestliže platí

$$u_A(t) + u_B(t) + u_C(t) = 0 \quad \text{nebo} \quad \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0,\tag{3.3}$$

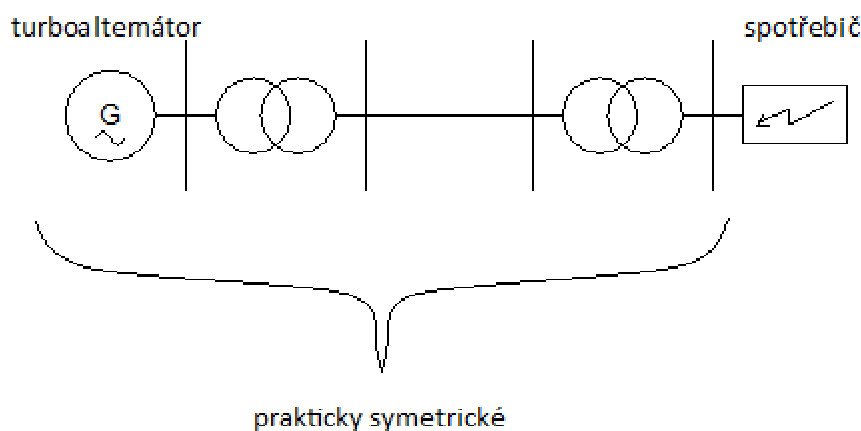
tak je soustava vyvážená. Vyvážená soustava nemusí být symetrická (např. nesymetrické zatížení bez zapojení středního vodiče).



Obr. 3.1 Fázorový diagram trojfázové symetrické soustavy

3.1. Teoretický rozbor nesymetrie

Optimální je takový stav, kdy je celá trojfázová soustava symetrická. Zcela symetrická soustava se vyskytuje jen v teoretické rovině. Ve skutečnosti však vždy každé zařízení vykazuje jistou nesymetrii. Na obrázku 3.2 je znázorněno schéma toku výkonu od zdroje ke spotřebiči.



Obr. 3.2 Schéma toku výkonu od zdroje ke spotřebiči

Synchronní alternátor můžeme považovat téměř za symetrické zařízení, stejně jako asynchronní generátor pracující na malé vodní elektrárně. U vedení se mírně projevuje nesymetrie z důvodů nesymetrického uspořádání vodičů. Podle uspořádání má každý vodič buď jinou kapacitu nebo jinou indukčnost. V provozu je nesymetrie vedení tak malá, že pozbývá na významu, a tam, kde její velikost by již byla podstatná, provede se transpozice vedení. U trojfázových transformátorů se nesymetrie projevuje vlivem různé vzdálenosti sloupků jádra transformátoru. Mezi krajními sloupky je větší vzdálenost než mezi sloupkem prostředním a krajním. Kvůli nestejně vzdálenosti sloupků jádra je potřeba mezi krajními sloupky většího

magnetického napětí než mezi sloupkem prostředním a krajním. To vyvolává nesymetrický magnetizační proud v transformátoru. V technické praxi lze však všechna uvedená zařízení považovat za symetrické.

3.1.1. Příčiny a důsledky nesymetrie

Nesymetrii lze rozlišit na:

- nesymetrii amplitudovou
- nesymetrii úhlovou.

Amplitudová nesymetrie nastává tehdy, když se liší velikosti napětí nebo proudů. Pokud nejsou stejné velikosti úhlů mezi sousedními fázemi, jedná se o nesymetrii úhlovou. Jestliže působí amplitudová a úhlová nesymetrie současně, nazýváme tuto nesymetrii obecnou. Obecná nesymetrie se vyskytuje nejčastěji. Podle veličin se nesymetrie rozděluje na:

- nesymetrii proudovou
- nesymetrii napětíovou.

Pokud se dá považovat elektroenergetická soustava za symetrickou, pak příčinou nesymetrie je připojení nesymetrických zdrojů či zátěží do soustavy. Připojení nesymetrických zdrojů nemá velký význam, neboť se většinou jedná o výkup elektřiny z obnovitelných zdrojů, zvláště z malých fotovoltaických elektráren. Připojení nesymetrických zátěží tvoří zásadní původ nesymetrie, jak napětíové, tak proudové. Jedná se především o jednofázové spotřebiče připojované k hladinám VN a VVN. Mezi typické jednofázové zátěže připojované k těmto hladinám patří indukční elektrický ohřev, přímý odporový ohřev a elektrická trakce 25 kV, 50 Hz.

Odběry na hladině nízkého napětí v distribuční síti jsou zpravidla jednofázové. Tyto sítě napájí ve většině případů domácnosti. Již při projektování elektrických přípojek je snaha rozložit zatížení rovnoměrně na všechny tři fáze. Vlivem nesoučasnosti spínání různých spotřebičů a vlivem malého zkratového výkonu nelze zcela zaručit symetrii napětí. Na distribučním transformátoru kolísá nesymetrie vlivem statistického rozptylu provozních stavů. Tyto odběry však přesto nezpůsobují velkou nesymetrii.

Všechny nesymetrické spotřebiče způsobují proudovou nesymetrii. Vzniklá proudová nesymetrie je podél vedení, na kterém není další odběr, konstantní. Na impedanci vedení způsobuje nesymetrický odběr nesymetrický úbytek napětí. Napětí na konci vedení je zmenšeno o tento úbytek a tak i napájecí napětí v místě odběru je nesymetrické. V místě nesymetrického odběru je napětíová nesymetrie největší a směrem ke zdroji se snižuje.

Nesymetrii napětí způsobují také jednofázové zemní, dvoufázové a dvoufázové zemní zkraty. Tyto stavy se považují za poruchové. Při poruchových stavech dochází k poklesu napětí v jedné nebo ve dvou fázích, ale je možné i přepětí v neporušené fázi. Poruchové stavy jsou obvykle klasifikovány jako náhodné jevy a jsou zpravidla vypínány ochranami.

Při průchodu nesymetrických proudů vedením jsou některé vodiče namáhány více a větší průchozí proudy danými vodiči zvyšují ztráty na jednotku přeneseného výkonu. K podobnému jevu dochází také u transformátoru, kdy jsou některá vinutí proudově víc namáhána a proto u nich dochází k většímu oteplení. Netočivá složka, k jejímuž vzniku dochází

při zatížení středního vodiče hvězdy či lomené hvězdy, způsobuje ve vinutí spojeného do trojúhelníku cirkulující proud, který zvyšuje oteplení transformátoru. Magnetický tok transformátoru se uzavírá přes konstrukční části nádoby, ve kterých se indukují vířivé proudy ohřívající nádobu i ostatní konstrukční části transformátoru. U synchronních strojů dochází vlivem zpětné složky proudu k indukování napětí do amortizéru stroje, který se ohřívá. Nesymetrické zatížení synchronního stroje způsobuje nerovnoměrné oteplení jednotlivých vinutí statoru a proto se musí snížit jeho maximální výkon, aby nedošlo k překročení dovoleného oteplení. Proudová nesymetrie způsobuje na souměrných zařízeních přídavné ztráty a nevyužití přenosové schopnosti soustavy.

Napěťová nesymetrie působí nepříznivě na zapojené symetrické spotřebiče. U asynchronních strojů dochází k nerovnoměrnému oteplení jednotlivých vinutí. Při zvýšení napětí jedné fáze dojde ke zvýšení proudu touto fází několikrát více, než je poměrný vzrůst napětí. Pak při stejném zatížení stroje je jeho celkové oteplení vyšší, což způsobuje kratší životnost izolace a potažmo i stroje. Závislost životnosti na oteplení platí obecně u všech elektrických strojů. Nesymetrické napětí nevytváří ve stroji kruhové magnetické pole, ale vytváří pole eliptické. Nekruhové magnetické pole může způsobit průchod ložiskových proudů strojem, což má velký vliv na životnost ložisek ve stroji. Zpětná složka proudů vytváří protimoment vůči sousledné složce a v podstatě brzdí stroj.

Velmi nepříznivě se nesymetrie napětí projevuje u trojfázových usměrňovačů. U usměrňovačů s indukčním filtrem je situace poměrně dobrá, neboť tlumivka brání prudkým změnám velikosti proudu, horší situace je pak u usměrňovačů s filtrem kapacitním. Zde i poměrně malé navýšení napětí jedné fáze způsobí značné zvětšení proudu danou větví usměrňovače, což může být nebezpečné pro polovodičové prvky usměrňovače.

3.1.2. Metoda souměrných složek

Řešení nesymetrických soustav, kdy každá fáze má jinou velikost napětí a jiný fázový posun vůči ostatním fázím, je těžce řešitelnou záležitostí, pokud se neužije rozkladu na souměrné složky [10]. Metodu rozkladu lze použít na napětí, proudy a impedance. Ve výkladu budou uvedeny vztahy pro rozklad na složkové soustavy s napětím.

S řešením rozložit nesymetrickou trojfázovou soustavu do tří souměrných složek přišel jako první C. L. Fortescue v roce 1918. Tato metoda patří mezi nejznámější a nejpoužívanější a byla po autorovi pojmenována. Lze se také setkat s rozkladem na diagonální složky α , β , 0 (autorka E. Clarkeová – 1938), metodou složek S, D, Z (autor E. W. Kimbark - 1939) a metodou složek R, S, T (autor N. Koga – 1956).

Podle Fortescuovy teorie je možné rozložit každou n-fázovou nesymetrickou soustavu na (n-1) symetrických složkových soustav vytvářejících rotační magnetické pole a jednu, která rotační pole nevytváří a má pulsující charakter. Trojfázovou soustavu napětí $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ lze tedy rozložit na

- soustavu souslednou (synchronní) $\underline{U}_{A(1)}, \underline{U}_{B(1)}, \underline{U}_{C(1)}$,
- soustavu zpětnou (inverzní) $\underline{U}_{A(2)}, \underline{U}_{B(2)}, \underline{U}_{C(2)}$,

- soustavu netočivou (nulovou) $\underline{U}_{A(0)}, \underline{U}_{B(0)}, \underline{U}_{C(0)}$.

Jelikož každá ze složkových soustav má stejné velikosti všech tří fázorů, zapisuje se soustava sousledná jedním fázorem $\underline{U}_{(1)}$. Podobně se zapisuje soustava zpětná $\underline{U}_{(2)}$ a soustava netočivá $\underline{U}_{(0)}$. Aby se zjednodušily zápisy rovnic, byl zaveden operátor natočení \mathbf{a} , pro který platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \mathbf{a}^2 &= e^{j\frac{4\pi}{3}} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \mathbf{a} + \mathbf{a}^2 + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

U symetrické soustavy platí, že

$$\underline{U}_A ; \quad \underline{U}_B = \mathbf{a}^2 \cdot \underline{U}_A ; \quad \underline{U}_C = \mathbf{a} \cdot \underline{U}_A . \quad (3.5)$$

Rozklad na složkové soustavy podle Fortescuovy teorie je dán následujícím maticovým zápisem.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{(0)} \\ \underline{U}_{(1)} \\ \underline{U}_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Maticovému zápisu odpovídá soustava rovnic:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \\ \underline{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \mathbf{a} \cdot \underline{U}_B + \mathbf{a}^2 \cdot \underline{U}_C) \\ \underline{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \mathbf{a} \cdot \underline{U}_B + \mathbf{a}^2 \cdot \underline{U}_C) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Po rozložení původní nesymetrické soustavy na souměrné složky se daný nesymetrický problém vyřeší ve složkových souměrných soustavách a výsledek řešení se zpětně složí na původní nesymetrickou soustavu následujícím zápisem:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{(0)} \\ \underline{U}_{(1)} \\ \underline{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Zápisu odpovídají rovnice:

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= \underline{U}_{(0)} + \underline{U}_{(1)} + \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_B &= \underline{U}_{(0)} + a^2 \cdot \underline{U}_{(1)} + a \cdot \underline{U}_{(2)} \\ \underline{U}_C &= \underline{U}_{(0)} + a \cdot \underline{U}_{(1)} + a^2 \cdot \underline{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (3.9)$$

Matice

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

se nazývá Fortescuova. Její determinant má velikost $|F| = 3j\sqrt{3}$.

Trojfázová nesouměrná soustava i každá z jejích tří souměrných složek je v Gaussově rovině zobrazena fázory, kterým přísluší komplexory (rotující fázory). Ty se zpravidla otáčejí v kladném matematickém smyslu úhlovou rychlostí ω kolem počátku. Trojfázová nesouměrná soustava a sousledná složka mají stejný sled fází. Zpětná složka má sled fází opačný. Netočivá složka je tvořena třemi pulsujícími, na sobě ležícími fázory.

Pomocí metody souměrných složek je možno vyjádřit míru nesymetrie soustavy. Pro posouzení nesymetrie soustav se zavedl činitel nesymetrie a to jak napětíové tak i proudové. Činitel nesymetrie je definován jako poměr amplitud (nebo efektivních hodnot) zpětné a sousledné složky.

$$\rho_u = \left| \frac{\underline{U}_{(2)}}{\underline{U}_{(1)}} \right| \cdot 100 \% \quad (3.11)$$

$$\rho_i = \left| \frac{\underline{I}_{(2)}}{\underline{I}_{(1)}} \right| \cdot 100 \% \quad (3.12)$$

Nevyváženost v trojfázových soustavách je způsobena netočivou složkou. Jestliže je netočivá složka nulová, je daná soustava vyvážená. Posuzujeme ji činitelem nevyváženosti, který je definován jako poměr amplitud (nebo efektivních hodnot) netočivé a sousledné složky.

$$\nu_u = \left| \frac{\underline{U}_{(0)}}{\underline{U}_{(1)}} \right| \cdot 100 \% \quad (3.13)$$

$$\nu_i = \left| \frac{\underline{U}_{(0)}}{\underline{U}_{(1)}} \right| \cdot 100 \% \quad (3.14)$$

Jak bylo zmíněno výše, pro výpočet sousledné, zpětné i netočivé složky a tudíž i pro výpočet činitele nesymetrie je potřeba znát nejen efektivní hodnoty fázových napětí, ale i jejich

fázové natočení. Činitel napět'ové nesymetrie také lze vypočítat přímo ze změřených hodnot napětí bez rozkladu na souměrné složky [11].

$$\rho_u = \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 - \sqrt{3 \cdot (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2 - 6 \cdot (U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4)}}{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2 + \sqrt{3 \cdot (U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2 - 6 \cdot (U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4)}}} \quad (3.15)$$

Tato metoda se pro svou jednoduchost hodí výborně pro praxi, kdy po experimentálním změření sdružených napětí a bez zjišťování jejich fázového natočení lze celkem jednoduše vypočítat činitel napět'ové nesymetrie a tím provést rychlou kontrolu velikosti nesymetrie. Tento jednoduchý postup umožňuje provést měření činitele napět'ové nesymetrie v trakčních napájecích stanicích. Je potřeba si uvědomit, že měření napětí musí být velmi přesné, neboť se naměřené hodnoty umocňují druhou a čtvrtou mocninou. Metoda je však použitelná pro zjišťování činitele napět'ové nesymetrie, pro zjištění velikosti činitele proudové nesymetrie ji nelze zpravidla použít.

Experimentální zjišťování nesymetrie pomocí RC filtrů sousledné a zpětné složky nelze vždy použít, neboť obsah harmonických vyšších řádů může negativně ovlivnit výsledek měření.

3.1.3. Normativní dokumenty týkající se nesymetrie

Trakční transformovny u SŽDC jsou napájeny z distribuční sítě o napětí 110 kV.

ČSN EN 50160 ed. 3

Norma ČSN EN 50160 ed. 3 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí) nově řeší kvalitativní parametry elektrické energie od napětí 36 kV do 150 kV mezi fázovými vodiči [4]. Nesymetrie je přiřazena do průběžných jevů, jejichž význam spočívá v odchylkách od jmenovitých hodnot v průběhu času provozu zařízení. Vznik průběžných jevů je dán především změnou způsobu zatížení, změnou zatížení a nelineárním zatížením. Článek 6.2.4 uvedené normy uvádí, že zpětná složka napájecího napětí musí být za normálních provozních podmínek v libovolném týdenním období v 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot v rozsahu 0 až 2 % složky sousledné. V některých oblastech však může být nesymetrie v předávacích místech až do 3 %. V této normě se vyhodnocuje pouze zpětná složka napájecího napětí, protože je podstatná z hlediska možných interferencí mezi spotřebiči.

PNE 33 3430-3

Podniková norma energetiky PNE 33 3430-3 (Parametry kvality elektrické energie. Část 3: Nesymetrie napětí.) stanovuje mezní hodnoty, výpočty a způsoby měření nesymetrie v sítích NN, VN a VVN [12]. Norma vykládá tři různé přístupy k popisu nesymetrie v třífázových sítích. Jedná se o metodu maximální odchylky, metodu dvou třetin maximální odchylky a metodu souměrných složek. V normě je upozornění na skutečnost, že přístupy založené na měření amplitud, tedy první dvě zmíněné metody, neberou v úvahu fázový posun

napětí. Metoda souměrných složek je založena na sčítání fázorů, která respektuje daný úhel a proto je obecnější. Její použití je nutné především v případech, kdy nesymetrie ovlivňuje značně fázový posuv.

Trakční transformovnu lze považovat za nesymetrické průmyslové zařízení. Při připojování jednofázového transformátoru TT do distribuční soustavy bývá s distributorem dohodnuto zapojení tak (střídání fází), aby nepříznivé vlivy vznikající provozem elektrické vozby měly nejmenší negativní dopad na distribuční síť. V tomto případě je možno zařízení uvést do zkušebního provozu, jestliže maximální příkon S_A bude splňovat následující podmínku:

$$S_K > 100 \cdot S_A \quad (3.16)$$

S_K je zkratový výkon ve společném napájecím bodě. Toto zařízení pak může být trvale provozováno, pokud za normálních provozních podmínek v libovolném týdenním období nepřesáhne 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot nesymetrie* R_{Sh} (viz vztah 3.20) ve společném napájecím bodě hodnotu 0,01.

Měření nesymetrie napětí ρ_u v daném časovém úseku T se provádí metodou poměru souměrných složek. Zjišťuje se velikost poměru zpětné složky napětí vyjádřené v procentech

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \%, \quad (3.17)$$

což může být vyjádřeno vztahem používaným pro metodu tří voltmetrů

$$\rho_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}}, \quad (3.18)$$

kde β

$$\beta = \frac{U_{L1L2}^4 + U_{L2L3}^4 + U_{L3L1}^4}{U_{L1L2}^2 + U_{L2L3}^2 + U_{L3L1}^2}, \quad (3.19)$$

kde U_{L1L2} je sdružené napětí mezi fázemi 1 a 2.

Pro vyhodnocování nesymetrie u rychle proměnných odběrů, jako jsou obloukové pece či trakční transformovny, je nutné volit krátký časový interval $T_{sh} = 10$ minut. Střední efektivní hodnota nesymetrie R_{Sh} se vypočte ze vztahu

$$R_{Sh} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{(\rho_u)_k^2}{M}}. \quad (3.20)$$

* Je třeba rozlišovat střední efektivní hodnotu zpětné složky a střední efektivní hodnotu nesymetrie. Střední efektivní hodnota zpětné složky je průměr efektivních hodnot napájecího napětí za sledovanou dobu (10 minut). Střední efektivní hodnota nesymetrie je vypočtena podle vztahu (3.20).

Celková doba sledování musí být alespoň jeden týden včetně soboty a neděle.

PPDS

Dokument Pravidla provozování distribučních soustav [13] určuje minimální technické, plánovací, provozní a informační požadavky na zařízení připojená k distribuční soustavě. PPDS jsou koncipována jako komplexní materiál pro uživatele distribuční soustavy.

Pravidla provozu distribučních soustav, příloha 3 – Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení stanovují, že se v síti 110 kV měří a vyhodnocují sdružená napětí. Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí, měřeného v časovém oknu 10 minut, menší než 1,5 % sousledné složky (tab. 24 přílohy 3 PPDS). Vzhledem k zjištěnému charakteru změn zpětné složky a možného negativního důsledku na ochrany proti nesymetrii se také doporučuje provádět měření v intervalu 3 s. Pro vyhodnocení nesymetrie mohou být uvažovány 10 minutové a/nebo 2 hodinové hodnoty. Interval měření musí být minimálně jeden týden. Způsob vyhodnocení je navrhován následovně:

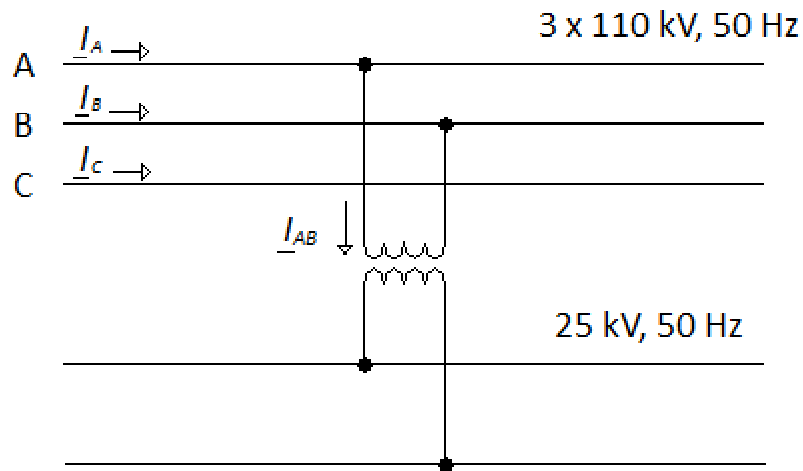
- může být počítán počet nebo procento hodnot, které během měření překročí dohodnuté meze
- a/nebo nejhorší naměřené hodnoty se mohou porovnat s hodnotami ve smlouvě
- a/nebo jedna či více hodnot, 95 % (případně jiné procento) týdenních hodnot vyjádřených v procentech se mohou porovnat s hodnotami ve smlouvě.

3.2. Výpočet nesymetrie při provozu zařízení používaných u SŽDC

Připojením jednofázové vozby k trojfázové elektrizační soustavě vzniká nesymetrický odběr proudu. Nesymetrický proud způsobuje proudovou nesymetrii v elektrizační soustavě. Na impedanci sítě vyvolává nesymetrický proud nesymetrický úbytek napětí. Z hlediska elektromagnetické kompatibility nemá činitel proudové nesymetrie ρ_i vypovídající hodnotu. Činitel napětíové nesymetrie ρ_u je v rámci EMC kvalitativně hodnocen a posuzován.

3.2.1. Výpočet nesymetrie „T“ spojení

Při tomto spojení je trakční transformátor zapojen podle *obrázku 3.3*. Jedná se tedy o jednofázový odběr ze sdruženého napětí. Spojení „T“ se vyskytuje při provozu méně vytížených tratí velice často.



Obr. 3.3 Schéma zapojení do „T“

Pro proudy platí:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} \\ \underline{I}_B &= -\underline{I}_{AB} \\ \underline{I}_C &= 0\end{aligned}\quad (3.21)$$

S užitím Fortescuovy teorie rozkladu nesymetrické soustavy na souměrné složky můžeme pro souslednou složku psát

$$\underline{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a) \quad (3.22)$$

a pro zpětnou složku

$$\underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a^2 \cdot \underline{I}_B + a \cdot \underline{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot (1 - a^2). \quad (3.23)$$

Velikost sousledné složky je

$$|\underline{I}_{(1)}| = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot \left| 1 + \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{\underline{I}_{AB}}{\sqrt{3}}, \quad (3.24)$$

zpětná složka má velikost

$$|\underline{I}_{(2)}| = \frac{1}{3} \cdot \underline{I}_{AB} \cdot \left| 1 + \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right| = \frac{\underline{I}_{AB}}{\sqrt{3}}. \quad (3.25)$$

Činitel proudové nesymetrie vychází

$$\rho_i = \frac{\left| \frac{I_{(2)}}{I_{(1)}} \right|}{\left| \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \right|} \cdot 100 \% = \frac{\left| \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \right|}{\left| \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \right|} = 100 \% . \quad (3.26)$$

Pro činitel napět'ové nesymetrie platí:

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \% = \frac{I_{(2)} \cdot Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \% = \frac{I_{AB} \cdot Z_{(2)}}{\sqrt{3} \cdot U_{(1)}} \cdot 100 \% \quad (3.27)$$

Pro výkon jednofázové zátěže platí

$$S_{1f} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cong \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{AB} \quad (3.28)$$

a trojfázový zkratový výkon vypočteme ze vztahu

$$S''_{k3} = \frac{c \cdot U_v^2}{Z_k} \cong \frac{1 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{(1)})^2}{Z_{(2)}} \cong \frac{3 \cdot U_{(1)}^2}{Z_{(2)}} . \quad (3.29)$$

Úpravou rovnice (3.26) dostaneme

$$\rho_u = \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{AB} \cdot \frac{Z_{(2)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cdot 100 \% . \quad (3.30)$$

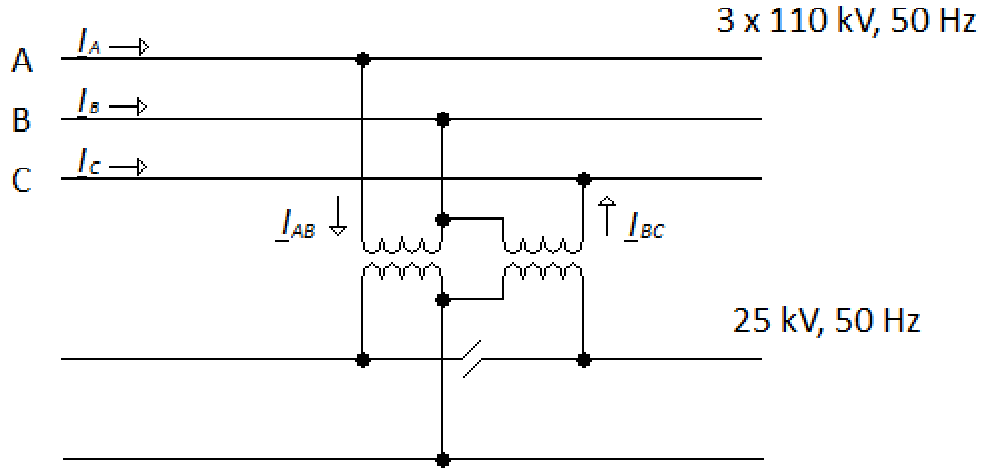
Je zřejmé, že se dají do rovnice (3.30) dosadit rovnice (3.28) a (3.29). Dosazením dostaneme

$$\rho_u \cong \frac{S_{1f}}{S''_{k3}} \cdot 100 \% , \quad (3.31)$$

což je přibližný vztah pro výpočet činitele napět'ové nesymetrie z odebíraného a zkratového výkonu. V tomto případě je součinitel c roven jedné. Výpočtové napětí U_v je rovno napětí sousledné složky. Pro celkovou impedanci sítě Z_k se předpokládá, že platí $Z_k = Z_{(1)} \cong Z_{(2)}$.

3.2.2. Výpočet nesymetrie „V“ spojení

Schéma zapojení trakčního transformátoru do „V“ je na *obrázku 3.4*. Jedná se o dva samostatné jednofázové transformátory, z nichž každý napájí přilehlý úsek trakčního vedení. Mezi napájenými vedeními je vloženo vedení bez trakčního proudu, tzv. neutrální pole, které se projíždí se staženými sběrači výběhem. Mezi sekundárními fázemi je při sousledném zapojení vývodů obou transformátorů fázové napětí 25 kV. Při nesouhlasném sledu fází dosáhne napětí mezi vývody transformátoru hodnoty $U = \sqrt{3} \cdot U_f = \sqrt{3} \cdot 25 \text{ kV} = 43,3 \text{ kV}$. Na toto napětí je třeba izolovat neutrální pole.



Obr. 3.4 Schéma zapojení do „V“

Pro proudy v obr. 3.4 platí:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{AB} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB} \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{BC}\end{aligned}\tag{3.32}$$

Proud sousledné složkové soustavy pak vychází

$$\begin{aligned}\underline{I}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C), \\ \underline{I}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{AB} + a \cdot \underline{I}_{BC} - a \cdot \underline{I}_{AB} - a^2 \cdot \underline{I}_{BC}),\end{aligned}\tag{3.33}$$

proud zpětné složkové soustavy

$$\begin{aligned}\underline{I}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a^2 \cdot \underline{I}_B + a \cdot \underline{I}_C), \\ \underline{I}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{AB} + a^2 \cdot \underline{I}_{BC} - a^2 \cdot \underline{I}_{AB} - a \cdot \underline{I}_{BC}).\end{aligned}\tag{3.34}$$

Činitel proudové nesymetrie pak vychází

$$\begin{aligned}\rho_i &= \frac{|\underline{I}_{(2)}|}{|\underline{I}_{(1)}|} \cdot 100 \% = \frac{\left| \frac{1}{3} \cdot (1-a) \cdot ((1+a) \cdot \underline{I}_{AB} - a \cdot \underline{I}_{BC}) \right|}{\left| \frac{1}{3} \cdot (1-a) \cdot (\underline{I}_{AB} - a \cdot \underline{I}_{BC}) \right|} \cdot 100 \%, \\ \rho_i &= \frac{|(1+a) \cdot \underline{I}_{AB} - a \cdot \underline{I}_{BC}|}{|\underline{I}_{AB} + a \cdot \underline{I}_{BC}|} \cdot 100 \%.\end{aligned}\tag{3.35}$$

Ze vztahu (3.35) je patrné, že velikost proudové nesymetrie závisí nejen na velikosti jednotlivých proudů, ale i na jejich účinnících.

Zavedením

$$\underline{I}_{BC} = k \cdot \underline{I}_{AB} \quad (3.36)$$

a

$$\varphi_{BC} = \varphi_{AB} + \delta \quad (3.37)$$

se může činitel proudové nesymetrie vyjádřit jako

$$\rho_i = \sqrt{\frac{1 + k^2 + 2k \cdot \cos(\delta + 60)}{1 + k^2 + 2k \cdot \cos \delta}} \cdot 100 \%. \quad (3.38)$$

Velikost proudové nesymetrie závisí na charakteru odběru v jednotlivých úsecích, tedy na velikostech proudů a na jejich účinníku. Na velikost účinníku má vliv konstrukce hnacího vozidla a také způsob jízdy vozidlem. Hodnoty účinníků se pohybují v rozmezí asi od 0,6 při rozjezdu vozidla až po 0,85. Průměrné hodnoty účinníků vozidel se pohybují kolem 0,77. Pokud budou proudové zátěže v obou úsecích shodné ($k = 1$) a budou se měnit pouze účinníky odběru, pak v tomto případě se činitel proudové nesymetrie bude pohybovat v rozmezí 0 % až 100 %. V případě stejných účinníků ($\delta = 0$) a rozdílných odběrových proudů se činitel proudové nesymetrie bude pohybovat v rozmezí od 50 %, kdy budou oba transformátory zatíženy stejně, až po 100 % při zatížení pouze jednoho z obou transformátorů. Stavů zatížení obou transformátorů přibližně odpovídá hustý provoz na trati. V případě ojedinělého provozu je zpravidla zatěžován jen jeden transformátor a proudová nesymetrie se blíží ke 100 % [14].

3.3. Technické prostředky pro zmírnění nesymetrie

Jednofázová vozba vytváří nesymetrické zatížení trojfázové soustavy, což způsobuje mimo jiné zvýšení ztrát při přenosu elektrické energie vlivem nevyužití přenosové schopnosti soustavy. Nesymetrie napětí má také vliv na jiné odběratele připojené k elektrizační soustavě. Těmto odběratelům mohou v důsledku nesymetrie vznikat problémy. Je zde proto snaha omezit nesymetrii nebo alespoň její následky.

Pro technickou praxi přichází v úvahu několik variant řešení. Zvětšením zkratového výkonu v místě připojení jednofázového odběru dosáhneme snížení impedance sítě, čímž při daném nesymetrickém proudovém odběru bude nesymetrický úbytek napětí menší. Tato varianta nesnižuje proudovou nesymetrii. V případě vedení distribuční sítě vhodně zvoleným směrem je možno napájet trakční transformovny z různých fází. Tím dojde k prostřídání fází a k rozložení nesymetrického odběru rovnoměrněji na všechny fáze. Jedná se o tzv. „štěpení fází“. Trakční transformovny SŽDC se zpravidla napájí z vedení o dostatečně velkém zkratovém výkonu, tedy z poměrně tvrdé sítě. S dodržováním maximální hodnoty činitele napěťové nesymetrie $\rho_u = 1,5 \%$ nebývají zpravidla obtíže i přes používání zapojení trakční transformovny do „T“. Při připojování napájecí stanice se odběratel (SŽDC) dohodne

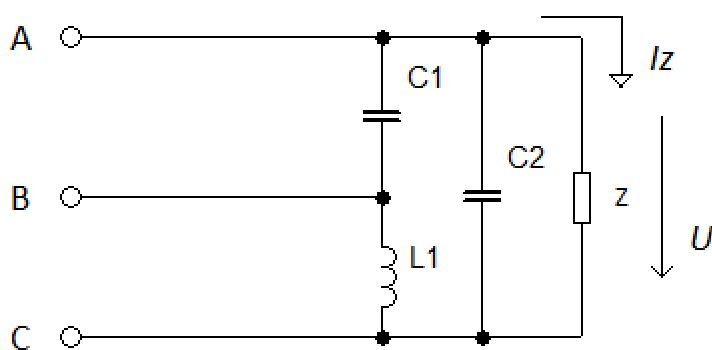
s distributorem, na kterou fázi bude transformátor připojen. Tím si distributor snaží udržovat symetrii v síti.

Zvláštní skupinou jsou ta zařízení, která přizpůsobují jednofázový odběr trojfázové elektrizační soustavě. Jedná se především o různá symetrizační zařízení a speciální konstrukce transformátorů.

3.3.1. Symetrizační zařízení

Symetrizační zařízení používána k symetrizaci jednofázové zátěže na trojfázovou energetickou soustavu bývají často konstruována za použití tlumivek a kondenzátorů. Tato zařízení se uplatňují především v oblastech málo časově proměnných odběrů, jakými jsou elektrotepelná zařízení. Možnosti použití symetrizačních zařízení pro symetrizaci dynamických odběrů jsou omezené. Hlavním důvodem omezení je především nutnost konstruovat proměnné reaktanční prvky tohoto zařízení. Rychlost změn velikostí daných prvků musí odpovídat rychlosti změn jednofázového trakčního odběru. Jediným schůdným řešením pro řízení symetrizačního zařízení je použití výkonové elektroniky. Takovéto řešení je však velmi finančně nákladné. Spínací prvky daného zařízení také mohou produkovat harmonické vyšších řádů, které by se musely odfiltrout dalším přídatným zařízením.

Jedno z možných zapojení symetrizačního zařízení je na *obr. 3.5*. V uvedeném schématu je rovněž řešena kompenzace účinníku odběru. Harmonické vyšších řádů produkované spotřebičem (elektrickými hnacími vozidly) by narušovaly správnou funkci symetrizačního zařízení. Proto je nutné ještě před symetrizací harmonické vyšších řádů odfiltrout. Některá novější hnací vozidla mají v konstrukci pamatováno na filtraci produkovaných harmonických, což je v podstatě nejsprávnější řešení.



Obr. 3.5 Symetrizační zařízení s kompenzací účinníku

Návrh hodnot prvků symetrizačního zařízení podle *obrázku 3.5* lze provést pomocí těchto vztahů:

$$C_2 = \frac{I_Z}{\omega \cdot C} (\sin \varphi_Z - \cos \varphi_Z \cdot \operatorname{tg} \delta_{CA})$$

$$C_1 = \frac{I_Z \cdot \cos \varphi_Z}{\omega \cdot U} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \operatorname{tg} \delta_{CA} \right)$$
(3.39)

$$L_1 = \frac{U}{\omega \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \operatorname{tg} \delta_{CA} \right)}$$

Kde

$$\delta_{CA} = \operatorname{arccotg}(3 \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi_C)).$$

Účinník $\cos \varphi_Z$ je účinník zátěže. Úhel φ_C je úhel požadovaného účinníku $\cos \varphi_C$ a platí, že $\cos \varphi_C = \cos \varphi_A = \cos \varphi_B$. V případě, že bychom chtěli symetrizovat na $\cos \varphi_C = 0,95$, tak vztahy (3.39) budou mít následující tvar:

$$C_2 = \frac{I_Z}{\omega \cdot U} (\sin \varphi_Z - 0,0119 \cdot \cos \varphi_Z)$$

$$C_1 = \frac{0,5654 \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z}{\omega \cdot U}$$
(3.40)

$$L_1 = \frac{1,697 \cdot U}{\omega \cdot I_Z \cdot \cos \varphi_Z}$$

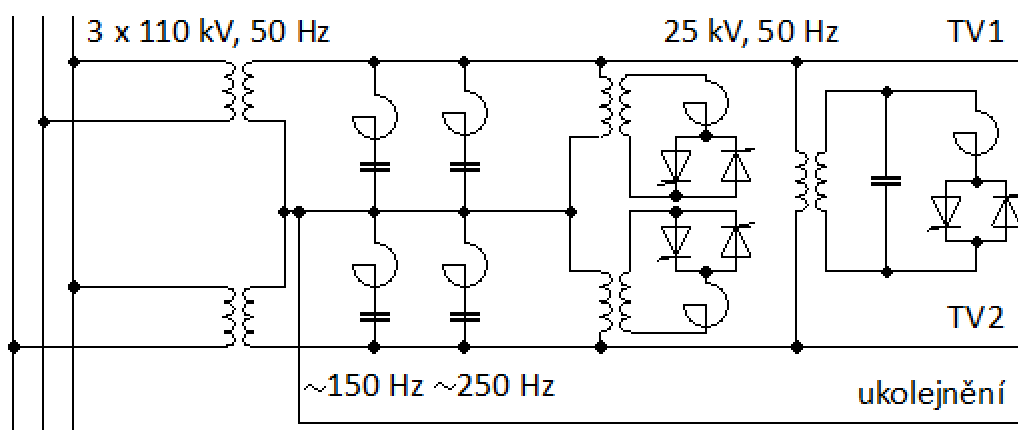
V nedávné době se pro zlepšení kvality elektrické energie začaly v distribučních sítích používat tzv. aktivní filtry. Způsobem zapojení filtru lze vylepšit proud, napětí či obě veličiny současně. Aktivní filtry jsou paralelně či sériově zapojené generátory řízené vhodným systémem tak, že snižují negativní vlivy zátěže na síť či síť na zátěž. Kombinované filtry vzniknou sdružením aktivního sériového a paralelního filtru.

Aktivní sériový filtr je zapojen mezi spotřebičem do série a je tvořen generátorem napětí. Tento filtr upravuje výstupní napětí na požadovaný tvar, čímž umožňuje udržovat napětí, kompenzovat krátkodobé poklesy i přepětí, odstraňovat harmonické a zajišťovat symetrii napětí. Paralelní aktivní filtr je tvořen generátorem proudu. Filtr je schopen odstranit nežádoucí složky proudu tak, že generuje stejné harmonické jako zátěž, ale s opačnou fází. Ty se pak vzájemně odečtou a výsledný proud je zbaven harmonických složek. Takto je možné kompenzovat harmonické vyšších řádů bez nebezpečí, že dojde k nežádoucím rezonancím v síti.

Generováním jalových složek proudů první harmonické je možno velmi rychle provádět kompenzaci účinníku. Paralelní aktivní filtr také umožňuje generování sousledných a zpětných složek proudů a tím upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou.

Je zřejmé, že aktivní sériový filtr upravuje vlastnosti sítě směrem od zdroje k zátěži. Dalo by se tedy říct, že chrání spotřebič před účinky sítě a dodává spotřebiči kvalitnější elektrickou energii. Paralelní aktivní filtr upravuje vlastnosti sítě od zátěže směrem ke zdroji. V podstatě chrání síť před účinky zátěže. S instalací aktivních filtrů se u trakčních transformoven SŽDC prozatím ve výhledu nepočítá.

Pro zmírnění nepříznivých účinků jednofázové vozby na napájecí elektroenergetickou soustavu bylo navrženo filtračně-kompenzačně-symetrizační zařízení. Principiální schéma je uvedeno na *obrázku 3.6*. Toto zařízení řeší filtraci harmonických pasivními filtry. Symetrizace je řešena změnou velikosti reaktance připojené mezi fázemi. Změnu reaktance zajišťují výkonové polovodičové prvky. Filtračně-kompenzačně-symetrizační zařízení se nepoužívá především z důvodu vysokých investičních nákladů.



Obr. 3.6 Filtračně-kompenzačně-symetrizační zařízení

3.3.2. Speciální konstrukce transformátorů

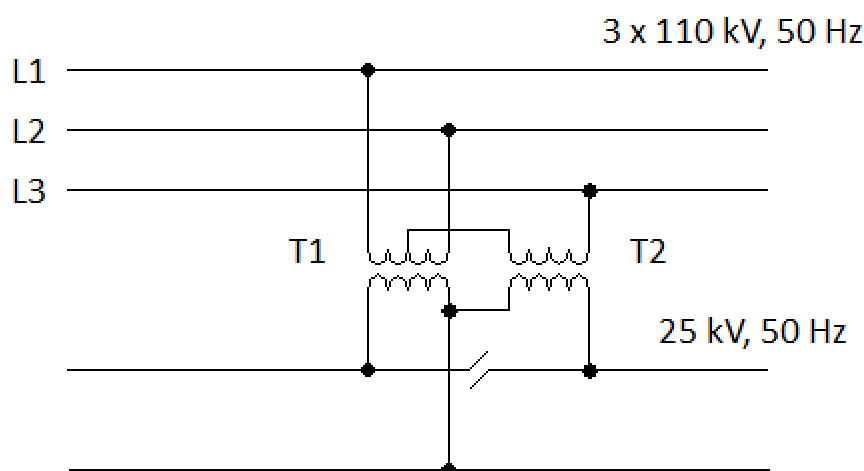
Pro zlepšení nesymetrie bylo vytvořeno několik typů transformátorů. Některé typy nesymetrie jen zmírňují, jiné téměř zcela za určitých podmínek eliminují. Je nutné pamatovat na skutečnost, že průběh okamžitého výkonu základní harmonické jedné fáze je tepavý a periodický. Součet okamžitých výkonů tří fází v trojfázové soustavě je konstantní. Proto nelze pomocí transformátorů zcela symetrizovat jednofázovou zátěž k točivé soustavě.

Nejznámější je Scottův transformátor, jehož schéma zapojení je na *obrázku 3.7*. Scottův transformátor mění trojfázovou symetrickou soustavu na symetrickou soustavu dvofázovou. Napětí dvofázové soustavy ze Scottova transformátoru jsou na sebe kolmá. Mezi fázemi je sdružené napětí o velikosti $\sqrt{2} \cdot 25 \text{ kV} = 35,4 \text{ kV}$. Je proto nutné podobně jako při použití zapojení do „V“ oba úseky ve styku trolejového vedení dělit neutrálním polem, které zamezuje

zkratu mezi fázemi při průjezdu sběrače lokomotivy. V případě, že dochází k odběru stejných výkonů z obou sekundárních fází současně, rozděluje se výkon na primární straně rovnoměrně mezi všechny tři fáze. Ve Scottově spojení jsou použity dva transformátory. Transformátor T1 má primární vinutí připojené na sdružené napětí mezi dvěma fázemi a vyveden střed vinutí. Tento transformátor se někdy také označuje jako „základní“. Transformátor T2 je připojen na vyvedený střed vinutí transformátoru T1 a na ještě nezapojenou fázi. Někdy transformátor T2 označuje jako „výškový“. Sekundární napětí a výkony obou transformátorů jsou shodné.

Primární napětí výškového transformátoru má velikost $\frac{\sqrt{3}}{2}$ napětí transformátoru základního.

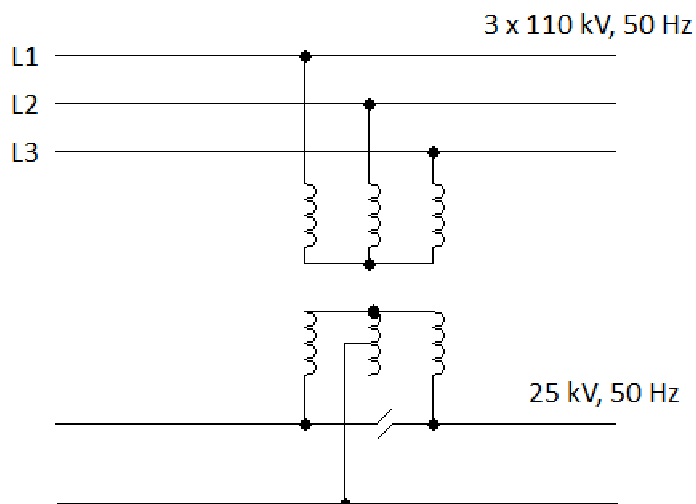
Zpravidla se konstrukčně řeší Scottovy transformátory jednotně, aby se daly použít jako výškové i jako základní.



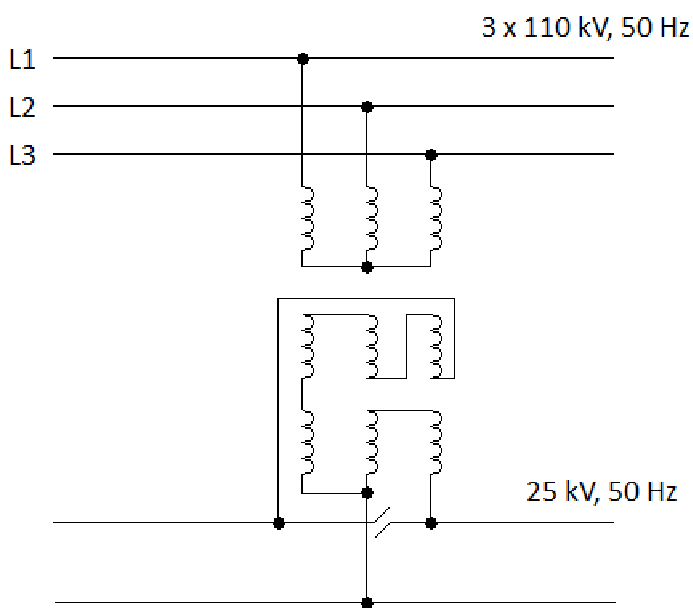
Obr. 3.7 Schéma zapojení Scottova transformátoru

Podobně, jako Scottův transformátor, vytváří na sekundární straně dvě na sebe kolmá napětí trojfázový transformátor s nesymetricky zapojeným vinutím. Sekundární vinutí tohoto provedení transformátoru je zapojeno do hvězdy. U vinutí jedné sekundární fáze je vyvedena odbočka, která je připojena zpětným vedením ke kolejnicím. Každá ze zbývajících dvou fází je připojena na jeden napájený úsek vedení. Úseky vedení musí být v tomto případě mezi sebou izolovány. Schéma zapojení transformátoru s nesymetrickým vinutím je na *obrázku 3.8*.

Dalším možným způsobem, jak částečně přizpůsobit trakční zátěž trojfázové soustavy, je použití Leblancova transformátoru, jehož zapojení je na *obrázku 3.9*. Tento transformátor vytváří dvě na sebe kolmá napětí, podobně, jako je tomu v předešlých případech.



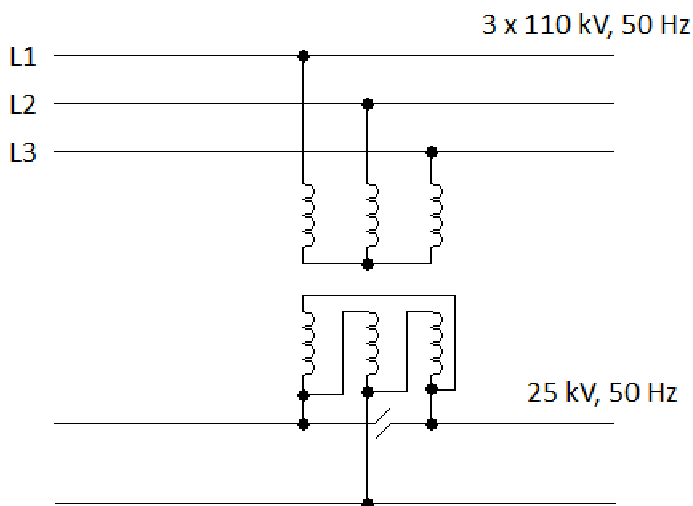
Obr. 3.8 Transformátor s nesymetricky zapojeným vinutím



Obr. 3.9 Zapojení Leblancova transformátoru

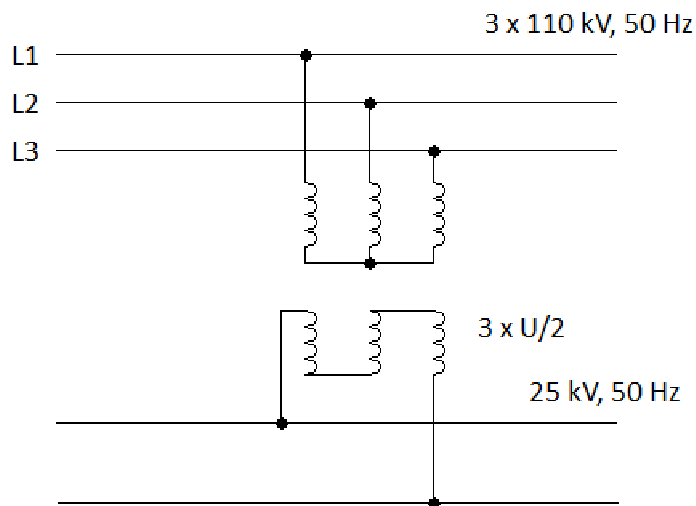
Pro napájení drah se také bez větších obtíží dá využít klasická konstrukce trojfázového transformátoru, jaká se běžně používá v energetice, viz *obr. 3.10*. Tento transformátor bývá zpravidla v zapojení Yd1 nebo Yd11. Spojení do trojúhelníku je použito záměrně z důvodu potlačení především harmonické třetího řádu. Jeden vývod ze sekundárního vinutí je ukolejněn a zbývající dva jsou připojeny k trakčnímu vedení. Při zatížení jednoho úseku vedení je přímé vinutí transformátoru zatíženo $2/3$ odebíraného proudu, ostatní dvě vinutí jsou zatížena jen z $1/3$. V případě stejného odběru z obou napájených úseků vedení jsou přímá vinutí zatížena

z $1/3$ a vinutí spojující oba úseky je zatíženo ze $2/3$. Nesymetrie je při použití trojfázového transformátoru stejná jako při použití zapojení do „V“.



Obr. 3.10 Trojfázový transformátor

Lze také užít zapojení trojfázového transformátoru s jednofázovým výstupem, podobně jako je na *obrázku 3.11*. Sekundární vinutí jsou zapojena do série, každé z vinutí je navrženo na polovinu požadovaného výstupního napětí. Zdánlivý příkon takového spojení transformátoru je 1,5 krát větší, než odebíraný činný výkon na sekundární straně.



Obr. 3.11 Transformátor s jednofázovým výstupem

V provozu SŽDC se speciálních konstrukcí transformátorů nepoužívá. Je to především odůvodněno jejich složitější konstrukcí. Složitější konstrukce bývá zpravidla poruchovější a investičně náročnější.

4. Měření na vybrané transformovně

Trakční napájecí stanice Blansko se nachází na dvoukolejné trati 260, která je součástí 1. koridoru. Nadmořská výška ŽST Blansko je 275 m.n.m. Trať 260 vede z Brna – Židenic (odbočka, zastávka, poloha 158,180 km) do stanice Česká Třebová (osobní nádrží, poloha 245,878 km). Na trati je položeno celkem 10 tunelů, z nichž nejdelší (Blanenský č.8/2) leží mezi zastávkou Adamov a ŽST Blansko a měří 556,71 m. Styk trakčních proudových soustav je na kótě 228,1 km. Na trati je povoleno rekuperační brždění.

Elektrický provoz na trati byl spuštěn začátkem roku 1999. Byl to poslední neelektrizovaný úsek 1. koridoru. Hlavní důvod, proč tento úsek nebyl elektrizován, byla náročná rekonstrukce tunelů. Jižní část tratě je elektrizována systémem 25 kV, 50 Hz, severní část systémem 3 kV ss. Přestože v blízkosti ŽST Svitavy se nachází trakční transformovna, je tato stanice elektrizována systémem 3 kV ss a to především z důvodu dopravní obslužnosti hnacími vozidly stejnosměrné soustavy z České Třebové. Zároveň je tím dodržena minimální ochranná vzdálenost (8 km) původních kolejových obvodů v České Třebové pracujících na kmitočtu 50 Hz od trakční proudové soustavy 25 kV, 50 Hz.

4.1. Elektrická část TNS

4.1.1. Rozvod 110 kV

Pro stavbu rozvodu 110 kV na trati 260 bylo u ČD (dnes SŽDC) použito zcela jiné řešení než do té doby obvyklé. Zpravidla se používaly venkovní rozvodny. V TT Blansko je instalován zapouzdřený rozváděč s jmenovitým napětím 123 kV. Zapouzdřený rozvod s izolací netečným plynem SF₆ (hexafluoridem sírovým) skýtá mnohé výhody oproti klasickým venkovním rozvodnám. Jedná se především o poměrně malý zastavěný prostor oproti klasickému provedení, vysokou provozní bezpečnost, vyšší spolehlivost a menší vliv nepříznivých účinků okolního prostředí na zařízení, zvláště vlhkosti a prachu. Takovéto řešení minimalizuje nároky na údržbu a při normálních provozních a pracovních podmínkách lze prakticky zařízení považovat za bezúdržbové.

Přívod elektrické energie k TT je na hladině 110 kV venkovními vedeními V 5526 a V 5527. Přejed z venkovního vedení do zapouzdřené rozvodny je proveden pomocí průchodek vzduch - SF₆. Svodiče přepětí jsou instalovány vně budovy v těsné blízkosti průchodek. Jsou na bázi oxidu zinečnatého se zkratovou odolností 10 kA. Celkem je jich instalováno 12 ks.

Rozvodna 110 kV se nachází v prvním patře budovy. Výrobce zapouzdřeného rozváděče typu ELK-O s izolací plynem SF₆ je firma ABB. Uspřádání rozvodu je dvouřadé s jedním systémem podélně dělených přípojníc (rozvodna typu „H“) se čtyřmi vypínači. Spínací přístroje mají jmenovitý proud 1250 A a zkratovou odolnost 31,5 kA.

Zapouzdřený rozvod končí na stanovišti transformátorů opět průchodkou SF₆ – vzduch. Celý zapouzdřený rozváděč je proveden jako trojfázový. Všechny tři fáze vycházejí z rozváděče průchodkou na stanovišti transformátorů a vodiče z průchodek jsou upevněny na bleskojistkách.

Jednofázové transformátory jsou připojeny na dva vyvedené vodiče, třetí vodič zůstává neobsazen. Pohled do zapouzdřené rozvodny je na *obrázku 4.1*.



Obr. 4.1 Zapouzdřená rozvodna 110 kV

4.1.2. Stanoviště trakčních transformátorů

V TT Blansko jsou instalovány dva trakční olejové transformátory. Jejich stanoviště jsou řešena jako dvě kryté, vzájemně oddělené transformátorové komory pro olejové transformátory. Každá komora je vybavena záchytnou jímkou pro celý objem oleje transformátoru. Transformátory jsou odizolovány od země z důvodu použití nádobových ochranných. Transformátor T2 je připojen na fáze L1 a L2, transformátor T1 na fáze L1 a L3.

Trakční transformátory jsou typu EJRH28M-O se jmenovitým zdánlivým výkonem $10 \text{ MV} \cdot \text{A} / 12,5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ (přirozené chlazení/chlazení s ofukováním) a s převodem $110 \text{ kV} \pm 8 \times 2 \% / 27 \text{ kV}$. Odbočky jsou provedeny přepínačem, který je schopen přepínat pod zatížením. Jmenovitá frekvence transformátorů je 50 Hz, Jmenovitý proud primárních vinutí transformátorů je 113.6 A, jmenovitý proud sekundárních vinutí je 463 A.. Výrobce trakčních transformátorů je Škoda – ETD Plzeň, s.r.o.

Nádoba transformátoru je zvonové konstrukce. Dvoujádrový magnetický obvod je zhotoven z transformátorových plechů válcovaných za studena s keramickou izolací. Vinutí tvoří hliníkové ploché izolované vodiče OCPN. Radiátorová baterie umístěna vzadu na transformátoru slouží k odvádění ztrátového tepla. Do výkonu $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ je chlazení přirozené, nad $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$ se chlazení provádí ofukováním radiátorů ventilátory. Řízení ofukování je automatické v závislosti na teplotě oleje. Transformátor je též vybaven dilatačními

nádobami pro tepelnou dilataci oleje. Mezi revizemi transformátor snese 200 zkratů proti zemi ve vzdálenosti 1 km od napájecí stanice.

Řízení regulace transformátoru je možno provést ústředně z elektrodispečinku, dálkově z dozorny, místně tlačítky ze skříně motorového pohonu nebo nouzově ručně klikou u motorového pohonu.

4.1.3. Rozvod 27 kV

V TT Blansko je jednořadá vnitřní kobková rozvodna 27 kV, nevýkonově dělená na tři části. Rozvodna je tvořena celkem 11 kobkami. Ze střední přípojnice je napájen olejový transformátor vlastní spotřeby TVS-1 o zdánlivém výkonu $60 \text{ kV} \cdot \text{A}$ a převodu $25/0,22 \text{ kV}$. Výrobce tohoto transformátoru je BEZ Bratislava. Z krajní části rozvodny jsou napájeny dva vývody N101 a N102 ve směru Brno a jeden vývod pro jedno FKZ. Z druhé krajní části jsou napájeny vývody N111 a N112 ve směru Česká Třebová a také je napájeno druhé FKZ. Proti přepětí je zařízení chráněno dvěma metaloxidovými ventilovými bleskojistkami.

V přední části kobek je namontován jednopólový vakuový vypínač, odpojovače (jeden nebo dva) a přístrojové transformátory proudu a napětí. Přístrojové transformátory napětí jsou chráněny vysokonapěťovými pojistkami. Z přední části kobek je rovněž přístupná ovládací skříň.



***Obr. 4.2** Vnitřní kobková rozvodna 27 kV*

V rozvodně je použito 8 kusů vakuových jednopólových vypínačů firmy SIEMENS typu 3AH4784-3. Vypínací schopnost vypínače je 25 kA, jmenovitý proud 1600 A. Pohon vypínače je elektrický střadačový na napětí 110 V ss. U vypínačů firmy SIEMENS dosahuje proud utržení oblouku 4-5 A, což je malá hodnota nezpůsobující velká přepětí.

4.1.4. Filtračně kompenzační zařízení

Původně se plánovalo použití trakční proudové soustavy 25 kV, 50 Hz pro méně vytížené tratě. Dodavatel elektrické energie tehdy uplatňoval pouze podmínku, že trakční výkon nesmí v místě odběru přesáhnout 2 % zkratového výkonu. Postupem času docházelo k nárůstu dopravy a ke zpřísňování požadavků na kvalitu elektrické energie.

Starší hnací vozidla Škody Plzeň používají na střídavé trakci vesměs regulaci přepínáním odboček na trakčním vozidlovém transformátoru. Napětí je poté usměrněno diodovým usměrňovačem (řady 230, 240). Novější dvou Proudové lokomotivy a jejich odvozené typy (řady 363, 362, 263, 262) mají v podstatě podobný princip usměrnění. Regulace se neprovádí transformátorem, ale pulsním měničem. Účinník odebíraného výkonu u těchto lokomotiv dosahuje k hodnotám 0,83 a časový průběh odebíraného proudu je značně deformován lichými harmonickými. V západních zemích se FKZ v napájecích bodech obvykle nebudují, protože kvalita odběru elektrické energie je nyní podmínkou pro moderní lokomotivy. V ČR se tak v podstatě řeší problémy současně provozovaných hnacích vozidel.

Pro odstranění negativních vlivů byly u SŽDC montovány FKZ do napájecích bodů. V TT Blansko bylo již s výstavbou FKZ uvažováno hned od začátku. Nejedná se tedy o pozdější dostavbu. Filtrační zařízení se skládá ze dvou paralelně zapojených větví, které jsou naladěny v blízkosti kmitočtů harmonické 3. a 5. řádu. Větve jsou tvořeny sériovým zapojením L a C. Ostrost filtru je dána činitelem jakosti sériového rezonančního obvodu. Ve zmíněné transformovně má kondenzátorová baterie jednoho filtru harmonické 3. řádu velikost 6,24 μF (8 kondenzátorů po 3,12 μF), tlumivka má indukčnost 196 mH. Kapacita kondenzátorové baterie větve harmonické 5. řádu je 4,68 μF (6 ks po 3,12 μF), tlumivka má velikost 91 mH.

Při provozu filtračních větví naladěných do blízkosti harmonické 3. a 5. řádu vykazují tyto větve na kmitočtu základní harmonické kapacitní charakter. Tím dochází ke kýžené kompenzaci induktivního odběru. Protože však je odběr trakčního a výkonu a účinníku proměnný, docházelo by k překompenzování při malých odběrech. Proto se k filtračnímu zařízení se přidává plynule měnitelná indukčnost. Indukčnost je tvořena dekompenzační tlumivkou a řídí se pomocí výkonové polovodičové elektroniky v závislosti na potřebném účinníku odběru. Je jasné, že pokud nebude odebírán žádný trakční proud, bude proud tekoucí dekompenzační tlumivkou a výkonovou elektronikou maximální. Zde vznikají přídatné ztráty, které zvyšují cenu trakční energie. Dle sdělení provozního zaměstnance dosahují maximální ztráty na jednom regulátoru přes 60 kW.

V TT Blansko jsou dekompenzační větve a větve pro harmonickou 5. řádu vybaveny odpojovači. Větve pro harmonickou 3. řádu nesmí být odpojovačem odpojena, jestliže má být v provozu větev harmonické 5. řádu. Dekompenzační větev je tvořena transformátorem 27 kV/5 kV, tlumivkou o indukčnosti 24,7 mH a měničovou skříň COMPACT s mikroprocesorovým regulátorem EMADYN vyrobenou firmou ČKD Elektrotechnika, a.s. Dekompenzační tlumivka a regulátor jsou připojeny na snížené napětí 5 kV. Volba snižovacího transformátoru v dekompenzační větvi byla v době instalace nutná, neboť podnik ČKD Elektrotechnika neuměl tenkrát ještě vyrobit polovodičové součástky (tyristory) na tak vysoké

napětí. Tlumivky a kondenzátory filtrů harmonických vyšších řádů jsou připojeny přímo na napětí 27 kV.

V transformovně jsou instalovány dvě FKZ. Při provozu v zapojení „V“ má každý transformátor jedno FKZ, při provozu v zapojení „T“ se může zvolit jedno ze dvou FKZ. Celkový instalovaný výkon FKZ je $2 \times 3 \text{ Mvar}$. Při projekci bylo pamatováno na možný pozdější požadavek instalace filtru harmonické 7. řádu, pro který je ponecháno volné místo. Přístavba tohoto filtru by si vynutila změny ve stávajícím uspořádání, pokud by měla být dodržena hodnota kompenzačního výkonu 3 Mvar .

4.1.5. Vlastní spotřeba

Napájení vlastní spotřeby trakční transformovny je řešeno pomocí jednofázového olejového transformátoru TVS-1 s převodem $25/0,22 \text{ kV}$ o zdánlivém výkonu $60 \text{ kV} \cdot \text{A}$, který je napájen z jedné z kobek rozvodny 27 kV . Transformovna je dále napájena trojfázovým nízkým napětím z kioskové trafostanice $22/0,4 \text{ kV}$, která je umístěna v areálu TT. Nízké napětí je též přivedeno z rozvodu zabezpečovacího zařízení ŽST. Blansko přes suchý oddělovací transformátor TOC s převodem $0,4/0,4 \text{ kV}$ o zdánlivém výkonu $63 \text{ kV} \cdot \text{A}$. Pro napájení pohonu výkonových vypínačů je v transformovně užito napětí 110 V ss v síti IT. Napětí se získává ze dvou usměrňovačů, z nichž v provozu bývá zpravidla jeden. Napětí z usměrňovače je přivedeno na dvě staniční olověné akumulátorové baterie. Každá baterie je tvořena 54 články o kapacitě 105 Ah [15]. Jedna z baterií je v pohotovostním provozu a druhá slouží jako 100% záloha. Pro napájení spotřebičů malého napětí je užito 24 V ss .

4.2. Měření v TT Blansko

Měření se uskutečnilo od 14.2.2012 od 13 hodin do 20.2. do 9 hodin. V době měření byl připojen pouze transformátor T2 podle schématu „T“.

Přehledové schéma TT Blansko je uvedeno v příloze A. Ve schématu jsou vyznačena místa připojení měřicí aparatury. Napětí a proudy byly převedeny měřicími transformátory proudů a napětí na normalizované proudy a napětí pro měřicí a ochranné přístroje, které jsou součástí inventáře transformovny.

Na hladině 110 kV jsou měřicí transformátory součástí zapouzdřeného rozvodu. Převod měřicího transformátoru proudu je $150/1 \text{ A}$, měřicí transformátor napětí má převod $110 \text{ kV} / \sqrt{3} / 100 \text{ V} / \sqrt{3}$. Měřicí transformátory napětí jsou zapojeny do hvězdy. V příloze 3 PPDS se předepisuje měřit na hladině 110 kV sdružená napětí. Jmenovitá velikost sdruženého napětí za těmito transformátory je 100 V . Na hladině 27 kV jsou použity měřicí transformátory napětí s převodem $27000/100 \text{ V}$, měřicí transformátory proudu mají převod $600/5 \text{ A}$.

Měřicí aparatura se sestávala z měřicího přípravku katedry elektrotechniky s převodníkem National Instruments USB 6210, notebooku a z proudových kleští. Uvedené zařízení bylo připojeno k ochranným obvodům trakční transformovny. Napětí se snímalo přímo ze svorkovnice a proudy byly snímány pomocí proudových kleští bez nutnosti rozpojení

ochranného obvodu. Na notebooku byl nahrán software vytvořený katedrou elektrotechniky speciálně pro účel dlouhodobého měření na energetických zařízeních.

V průběhu měření byly zaznamenávány okamžité hodnoty napětí a proudů. Ostatní potřebné veličiny (účinník, okamžitý výkon, harmonické zkreslení) byly dopočítány. Napětí a proudy byly snímány vzorkovací frekvencí 10 000 vzorků za sekundu. Z nasnímaných hodnot byly vytvořeny dvousekundové intervaly.

5. Vyhodnocení měření

Vytvořené dvousekundové intervaly jsem zpracovával v programu MS Excel. Dále jsou tyto hodnoty chápány jako okamžité. Byl vypočten činitel napět'ové nesymetrie a zdánlivý výkon transformátoru. Následovalo vypočtení 10-ti minutových intervalů činitele napět'ové nesymetrie a napájecího napětí. Desetiminutové hodnoty byly vyhodnoceny dle příslušných norem.

Klouzavý průměr činitele napět'ové nesymetrie se počítal podle vztahu:

$$\rho_{10'} = \frac{\sum_{n=1}^{300} \rho_u}{300} \quad (5.1)$$

Obdobným způsobem byly vypočteny klouzavé průměry ostatních veličin. Klouzavé hodnoty jsou průměrem daného počtu hodnot okamžitých. Pro každou následující hodnotu průměru je vždy (kromě prvních 300 hodnot) k dispozici 300 předchozích hodnot. Aby byla zaručena postupná návaznost jednotlivých desetiminutových intervalů, byl učiněn výběr každé 300-té hodnoty. Prvních 299 hodnot se nepočítalo vůbec. Protože je vybraná hodnota každá 300, nemá předchozích 299 klouzavých hodnot praktický význam. Celkem bylo vypočteno 839 desetiminutových intervalů

Kvalitu dodávky elektrické energie určuje norma ČSN EN 50160 ed. 3 a Příloha 3 PPDS. Limity jsou v těchto dokumentech udány pro 10-ti minutové průměry v pevných krocích. Vyhodnocování okamžitých hodnot je pro praxi nevhodné, protože zpracování tak velkého množství dat je neúměrně náročné. V případě rychle se měnících hodnot by časový průběh zvolených veličin byl značně nepřehledný, což by přispívalo ke špatné orientaci v naměřených datech. Naopak vyhodnocování dlouhých časových intervalů by bylo jednoduché a přehledné, ovšem dlouhé intervaly smazávají rozdíly u dynamicky proměnných odběrů. Proto byl normativně stanoven kompromis v podobě 10-ti minutového měřicího intervalu. Krátké časové intervaly jsou vhodné na vyhodnocování dynamických jevů, dlouhé dávají obraz o odběru v globálnějším měřítku.

Norma ČSN EN 50160 ed. 3 nepředepisuje pro velikost napájecího napětí v sítích VVN limity pro odchylky. V příslušném odstavci je uvedeno, že počet odběratelů v těchto sítích je omezen a zpravidla mají individuální smlouvy. Pro vyhodnocení nesymetrie napájecího napětí se předpokládají normální provozní podmínky. Za těchto podmínek se zpětná složka napájecího napětí musí v libovolném týdenním období v 95 % desetiminutových intervalů pohybovat v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky.

Příloha 3 PPDS již velikost napájecího napětí stanovuje. Za normálních provozních podmínek s vyloučením přerušení se napájecí napětí v 99 % desetiminutových intervalů musí pohybovat v rozsahu $110 \text{ kV} \pm 10 \%$, tedy od 99 do 121 kV. Vyhodnocují se sdružená napětí v každé fázi. Zde dochází ke zpřísnění, protože předchozí verze z roku 2009 a v nezměněné podobě z roku 2010 stanovuje 95 % desetiminutových intervalů ve výše zmíněném rozsahu

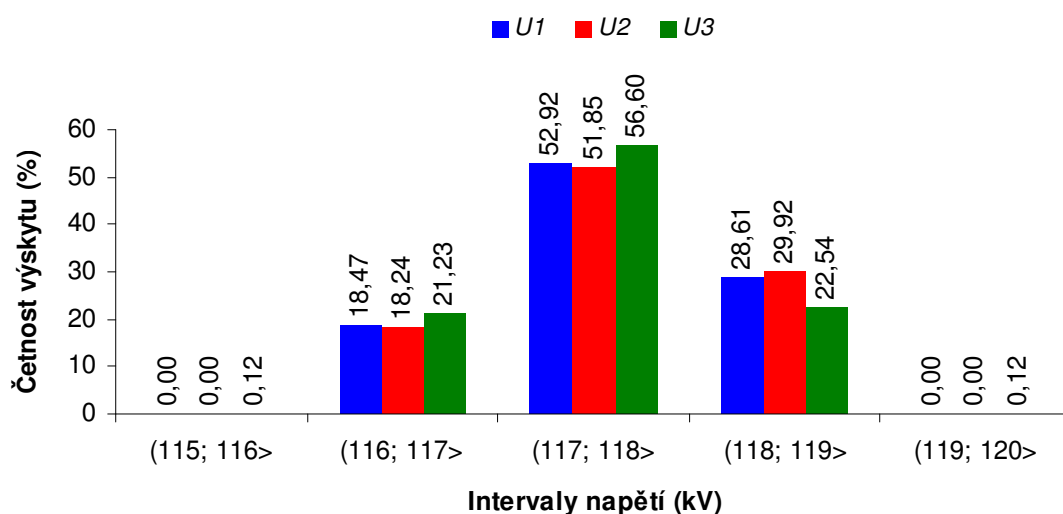
napájecího napětí. Prerušením se rozumí v příloze 3 PPDS pokles napětí ve všech fázích pod 5 % jmenovitého napájecího napětí. Maximální hodnota činitele napět'ové nesymetrie 1,5 % je stanovena za stejných podmínek jako v ČSN EN 50160 ed. 3.

Protože měření v trakční transformovně neprobíhalo celý týden, je k dispozici jen 839 desetiminutových intervalů. Naměřený soubor dat nedosahuje normou požadovaný počet měřicích intervalů pro vyhodnocení (z celotýdenního měření je jich normálně 1008), přesto je však možné pro účely tohoto měření považovat daný soubor dat za dostatečný a proto reprezentativní.

Byla vyhodnocena velikost napájecího napětí, činitel napět'ové nesymetrie v závislosti na odebíraném trakčním výkonu a velikost účinníku. Přibližně byl určen zkratový výkon v místě připojení trakční transformovny k distribuční síti.

5.1. Vyhodnocení napájecího napětí

Na obrázku 5.1 je histogram desetiminutových velikostí napájecího napětí, který udává procentní zastoupení v daných intervalech. Napětí U_1 je měřeno mezi fázemi L3 a L1, napětí U_2 mezi fázemi L1, L2 a napětí U_3 mezi fázemi L2 a L3.



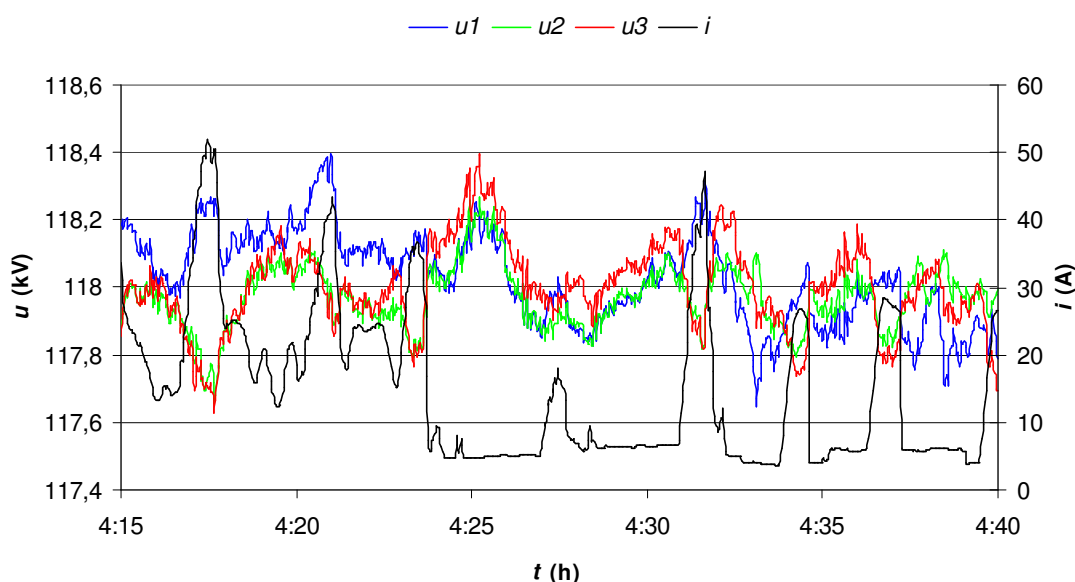
Obr. 5.1 Histogram napájecího napětí

Nejnižší napětí bylo naměřeno dne 17.2.2012 v 12:10 mezi fázemi L2-L3. Napětí mělo velikost 115,8 kV. Podobně nejvyšší napětí 119,0 kV se naměřilo mezi stejnými fázemi dne 16.2.2012 v 1:20. Nejvyšší 99 % hodnota 118,9 kV byla naměřena mezi fázemi L2-L3. Velikost a odchylky napájecího napětí splňují požadavky přílohy 3 PPDS.

V příloze B je zobrazen časový průběh desetiminutových hodnot napájecích napětí a odebíraného proudu v trakční transformovně. Z časového průběhu je patrný pokles odběru trakčního proudu v nočních hodinách. Také v sobotu a v neděli (18. a 19. února 2012) je odběr

nižší než v pracovních dnech. Je zřejmé, že napájecí napětí nevybočilo za celou dobu měření z povolené tolerance a ani v jednom případě nedošlo k přerušení.

Grafická závislost na *obrázku 5.2* zobrazuje časové průběhy okamžitých hodnot napětí ve všech fázích a odebíraný proud trakčním transformátorem ze dne 20.2.2012.



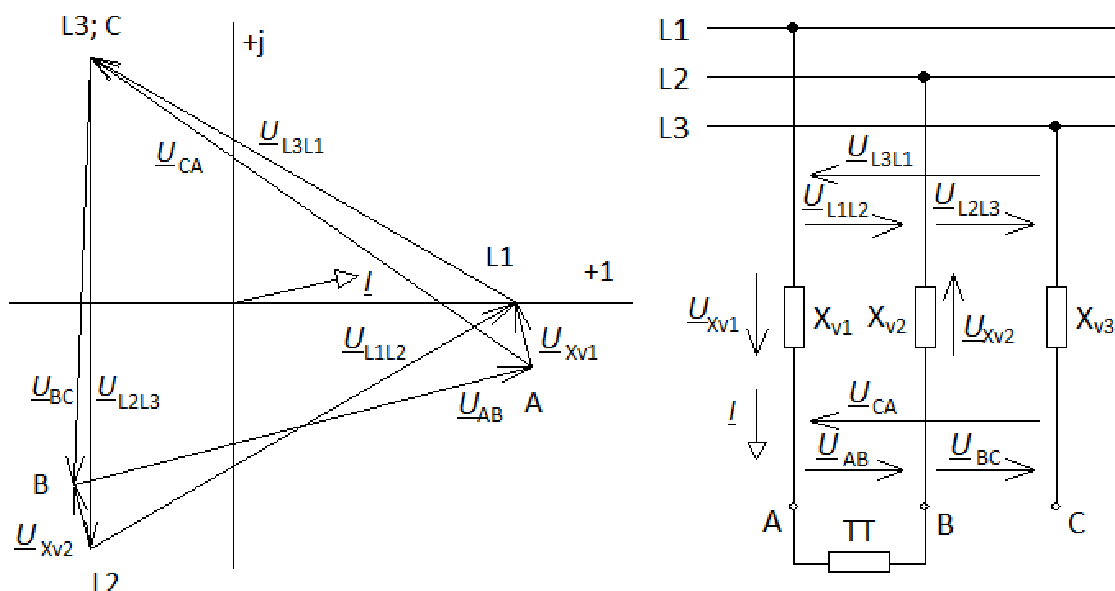
Obr. 5.2 Časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu

Ze závislosti je patrný vliv jednofázového odběru na velikosti jednotlivých napětí. Se zvětšujícím se odběrem dochází k růstu napětí U_1 a k poklesu napětí U_2 a U_3 , přičemž pokles napětí U_3 je větší než pokles napětí U_2 . Tento jev lze vysvětlit fázorovým diagramem v *obrázku 5.3*.

Kvůli zpřehlednění je fázorový diagram zjednodušen. U vedení se počítá pouze s indukční reaktancí vedení. Činný odpor, svod a kapacita jsou zanedbány. Zkratový výkon v přenosové soustavě se považuje za nekonečně velký. Celá soustava kromě odběru se předpokládá zcela symetrická. Tato zjednodušení lze pro praktické přiblížení použít, neboť kapacita a svod se téměř neuplatní a činný odpor lze u vedení 110 kV považovat přibližně za třikrát menší než indukční reaktanci. Vedení napájející TT je přivedeno z transformovny Čebín, kde dochází k transformaci z přenosové soustavy 400 kV na napětí distribuční soustavy 110 kV. Do reaktance vedení je tedy zahrnuta i reaktance transformátoru, což ještě zmenšuje vliv činného odporu vedení. Vzhledem k použití FKZ v TT lze považovat odběr za čistě činný.

Fázorový diagram zobrazuje napěťové poměry na vedení. Fázory \underline{U}_{Xv1} a \underline{U}_{Xv2} představují úbytky napětí na reaktanci vedení, fázory \underline{U}_{L3L1} , \underline{U}_{L1L2} a \underline{U}_{L2L3} zobrazují napětí v bodu s nekonečně velkým zkratovým výkonem. Odebíraný proud trakční transformovnou je

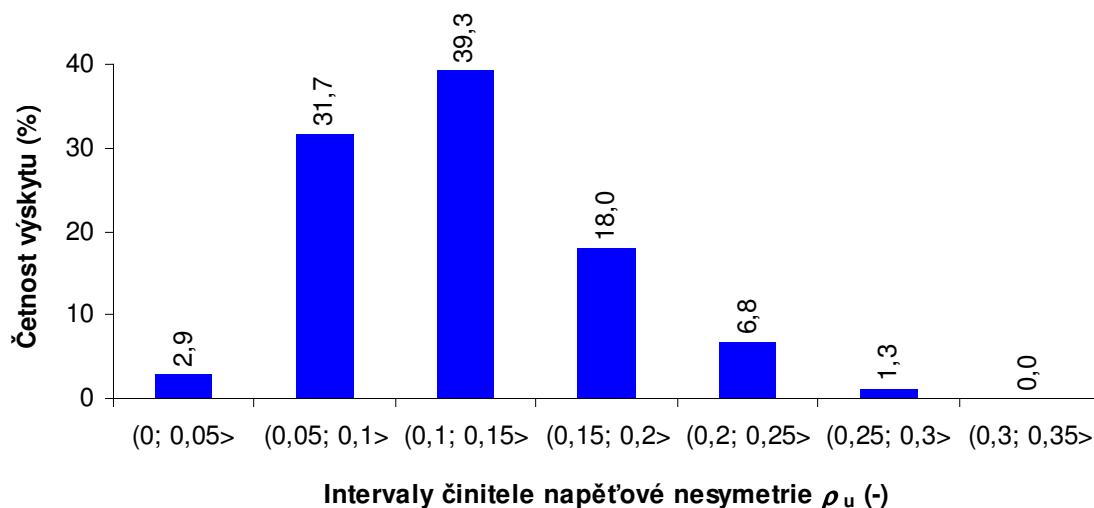
rovnoběžný s fázorem \underline{U}_{AB} . Úbytky na reaktanci vedení jsou kolmé na proud odebíraný trakční transformovnou.



Obr. 5.3 Fázorový diagram napěťových poměrů a schéma spojení do „T“

5.2. Vyhodnocení napěťové nesymetrie

Histogram činitele napěťové nesymetrie je na obrázku 5.4. Ten udává procentní výskyt činitele napěťové nesymetrie v uvedených intervalech.



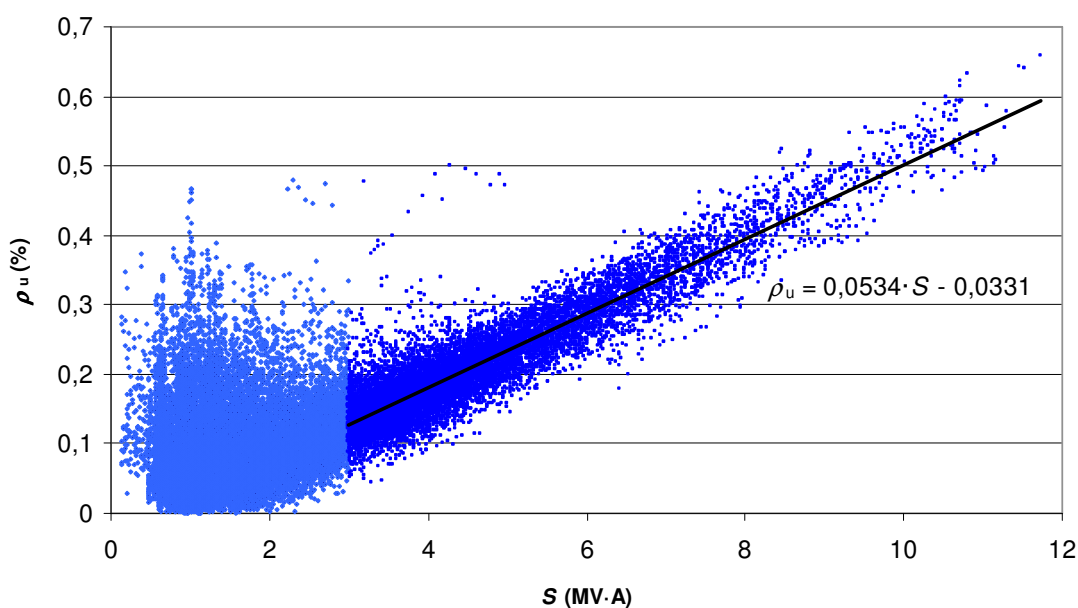
Obr. 5.4 Histogram činitele napěťové nesymetrie ρ_u

Jak je z histogramu patrné, zpětná složka napájecího napětí nedosáhla ani v jednom případě 0,3 % složky sousledné. Nejvyšší hodnota činitele napět'ové nesymetrie $\rho_u = 0,297$ byla dosažena 17.2.2012 v 7:10. V tuto dobu byl odběr trakčního transformátoru z napájecího vedení 6,33 MV·A. Velikost činitele napět'ové nesymetrie je hluboko pod mezí stanovenou přílohou 3 PPDS a mezí stanovenou ČSN EN 50160 ed. 3. Činitel napět'ové nesymetrie splňuje požadavky obou dokumentů.

Podle normy PNE 33 3430-3 lze u připojení provedených na základě individuálního vyhodnocení zapojení nesymetrických odběrů zařízení připojit tehdy, jestliže je splněna podmínka (3.16). Protože mi není známa velikost zkratového výkonu v napájecím bodu, nemohl jsem vyhodnotit dodržení této podmínky.

Pro vyčíslení střední efektivní hodnoty nesymetrie byl použit vztah (3.20). Podle PNE 33 3430-3 může být zařízení provozováno, jestliže 95 % středních efektivních hodnot nesymetrie nepřekročí za normálních provozních podmínek hodnotu 0,01. 95 % středních efektivních hodnot nesymetrie se pohybovalo pod hranicí 0,0024. Tomuto požadavku normy zařízení vyhovuje a může být trvale provozováno.

Vzájemná závislost činitele napět'ové nesymetrie ρ_u a zdánlivého výkonu S je uvedena v obrázku 5.5. Závislost je sestavena z okamžitých hodnot ze dne 16.2.2012.



Obr. 5.5 Závislost činitele napět'ové nesymetrie na výkonu

Každý bod v závislosti znázorňuje hodnotu dvousekundového činitele napět'ové nesymetrie při daném zatížení. Hodnoty v závislosti jsou rozděleny na dvě části. První část, která je vyznačená světlejší barvou, představuje přibližně oblast, o níž by se dalo říct, že velikost napět'ové nesymetrie nezávisí na odebíraném zdánlivém výkonu. V druhé části

vyznačené tmavší barvou je vidět výrazná závislost mezi odebíraným výkonem a činitelem napěťové nesymetrie. Velmi kritickým místem při vyhodnocování je volba hranice mezi jednotlivými oblastmi. Ta může výrazným způsobem ovlivnit výsledek. Jako hranice mezi oblastmi byla zvolena hodnota zdánlivého výkonu 3 MV·A. Pro ověření vhodnosti volby hranice mezi oblastmi dat byla stanovena korelace veličin v oblasti s výraznou závislostí činitele napěťové nesymetrie na zatížení. Korelace představuje funkci vzájemné závislosti mezi dvěma veličinami. Jestliže je jedna veličina závislá na druhé, lze usoudit, že mezi oběma veličinami je jistý vztah. Velikost vzájemného vztahu se vyjadřuje mírou korelace, která může nabývat hodnot $\langle -1; +1 \rangle$. Hodnota míry korelace 1 představuje přímou úměru mezi posuzovanými veličinami, míra korelace s hodnotou -1 vyjadřuje nepřímou úměru. V případě nulové hodnoty míry korelačního koeficientu není statisticky zjištělná závislost mezi posuzovanými veličinami, což však neznamená neexistenci závislosti. Hodnota korelačního koeficientu zmíněné oblasti byla vyčíslena na 0,92, což představuje výbornou shodu. Naměřené hodnoty v oblasti s výraznou závislostí činitele napěťové nesymetrie na zatížení byly proloženy regresní přímkou s udáním její rovnice. Pro přibližné stanovení zkratového výkonu lze vztah (3.31) přepsat do tvaru

$$S''_{k3} \cong \frac{S_{1f}}{\rho_u} \cdot 100 \% . \quad (5.2)$$

Po dosazení:

$$S''_{k3} \cong \frac{S_{1f} \cdot 100 \% }{0,0534 \cdot S_{1f}} = \frac{100}{0,0534} \cong 1870 \text{ MV} \cdot \text{A} \quad (5.3)$$

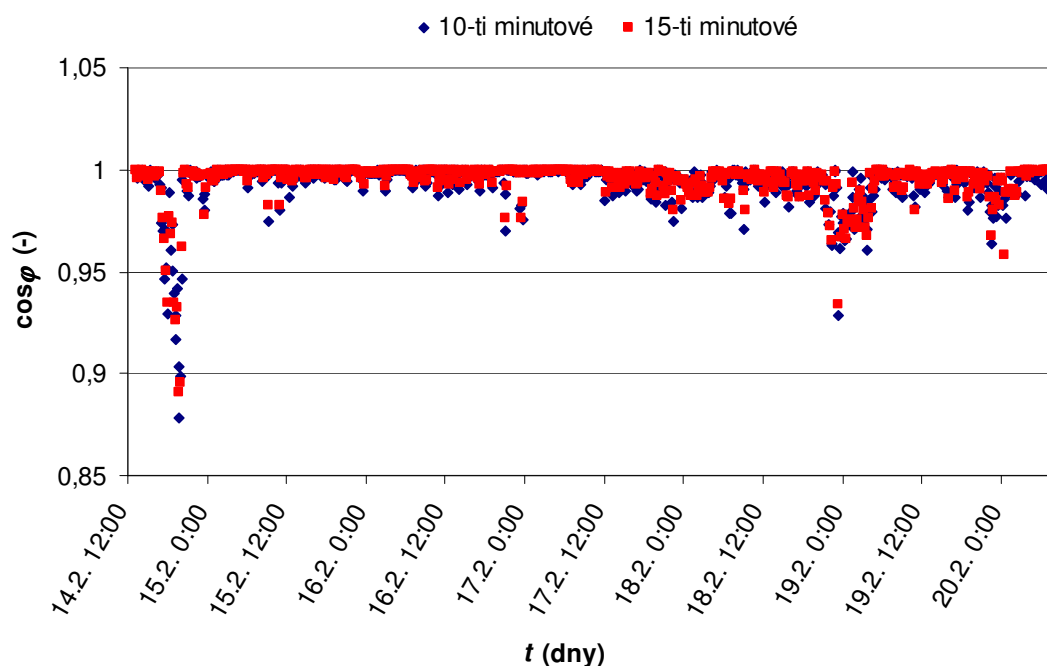
Je nutné zdůraznit, že se jedná pouze o přibližné určení zkratového výkonu. Výsledek je zkeslen pozadím napěťové nesymetrie v elektrizační soustavě a nepřesnostmi měřicích napěťových transformátorů. Bohužel není známa přesná velikost ani fázový posun chyby těchto transformátorů. Tím může za jistých podmínek dojít ke stavu, že činitel napěťové nesymetrie se bude snižovat se vzrůstajícím zatížením.

Časový průběh 10-ti minutových hodnot činitele napěťové nesymetrie ρ_u a zatížení trakční transformovny zdánlivým výkonem S je uveden v *příloze C*. Z časového průběhu je patrný vliv zdánlivého výkonu na činitel napěťové nesymetrie, stejně jako v *obr. 5.5*. Z grafické závislosti v *příloze B* lze vysledovat změnu zatížení v pracovních dnech (14., 15., 16., 17. a 20. února) a v sobotu a neděli (18. a 19. února). Taktéž je patrná změna hustoty provozu mezi nočními a denními hodinami.

5.3. Vyhodnocení účinníku

Pro účely tohoto měření byl účinník vyhodnocován v desetiminutových a patnáctiminutových časových intervalech. Pro fakturační měření se účinník vyhodnocuje ve čtvrthodinách.

V cenovém rozhodnutí č.5/2011 Energetického regulačního úřadu [16] je doporučení s ohledem na bezpečný chod elektrizační soustavy odebírat elektrickou energii s induktivním účinníkem $\cos \varphi = 0,95 - 1,00$. Jestliže odběratel udržuje účinník v udaném rozmezí, tak neplatí žádnou cenovou přírážku. Při induktivním účinníku nižším než 0,95 je zákazník povinen platit přírážku v souladu z výše zmíněným dokumentem. Při nevyžádané dodávce jalového výkonu je stanovena pevná sazba 440 Kč/Mvarh.



Obr. 5.6 10-ti a 15-ti minutové hodnoty účinníku

Na obr. 5.6 jsou zobrazeny hodnoty 10-ti a 15-ti minutového účinníku. Z grafické závislosti si lze učinit představu o kompenzační funkci FKZ. Pouze sedm čtvrt hodinových hodnot účinníku je mimo povolený interval 0,95 – 1,00, což představuje 1,25 % z 560 hodnot. V případě desetiminutových účinníků se mimo stanovený interval nachází 10 hodnot, tedy 1,19 %. Ve všech případech byly odběry i dodávky elektrické energie induktivního charakteru.

Velikosti 10-ti a 15-ti minutového účinníku ze dne 14.2.2012 v době asi od 19. do 20. hodiny a taktéž v noci z 18. na 19.2.2012 jsou nižší, než hodnoty účinníku v ostatních měřených intervalech. Domnívám se, že možnou příčinou nižších hodnot je vypnutí filtračně-kompenzačního zařízení.

6. Závěr

Při provozu jednofázového trakčního odběru z trojfázové soustavy vzniká problém s nesymetrickým zatížením napájecí sítě. Nesymetrické zatížení trojfázové soustavy vyvolává vyšší ztráty ve výrobě, přenosu a rozvodu elektrické energie. Jednofázový odběr způsobuje na impedancích sítě nesymetrické úbytky. V důsledku toho mohou být v napájecích bodech jiných odběratelů různě velká napájecí napětí jednotlivých fází, mezi kterými navíc nemusí být stejný fázový posun. Takovýto stav je pro odběratele nežádoucí, neboť zpravidla dochází ke zkracování životnosti elektrických strojů, jež jsou více tepelně namáhány. Pro kvantifikaci různých velikostí napájecích napětí ve fázích byl zaveden tzv. činitel napěťové nesymetrie, který udává poměr zpětné složky napájecího napětí ke složce sousledné.

Měření provedená na trakční transformovně měla pro mne seznamovací charakter s praktickým provozem drážního zařízení. Naměřené dvousekundové intervaly jsem zpracoval a vyhodnotil v tabulkovém procesoru. Výsledky vyhodnocení jsem uvedl v 5. kapitole.

Na trakční transformovně bylo měřeno při nejnevýhodnějším spojení do „T“, které způsobuje 100 % proudovou nesymetrii. Lze konstatovat, že ani v jednom desetiminutovém měřicím intervalu nebyly překročeny normami požadované hodnoty. Pouze v několika případech nebyl dodržen účinník. Napájecí napětí se pohybovalo v rozmezí od 115,8 kV do 119,0 kV, což vyhovuje dovolenému rozmezí 99 kV až 121 kV. Maximální velikost zpětné složky napájecího napětí dosahovala 0,297 % složky sousledné. Je zřejmé, že napěťová nesymetrie ve společném napájecím bodě netvoří akutní problém. Malý činitel napěťové nesymetrie též vypovídá o kvalitě distribuční soustavy. Zkratový výkon v místě připojení trakční transformovny byl přibližně určen na 1870 MV · A. Účinník se po dobu měření pohyboval v induktivní oblasti. Ve čtvrt hodinových měřicích intervalech vybočil ze stanoveného rozsahu 0,95 – 1,00 v sedmi případech. V desetiminutových měřicích intervalech nevyhověl danému rozmezí 10 krát.

Při připojování měřicí aparatury na sekundární stranu měřicích transformátorů napětí došlo omylem k záměně připojovacích vodičů. S odstupem času lze jen spekulovat, kde k záměně došlo. Pravděpodobně by chyba nebyla odhalena, kdybych si nevšiml růstu napětí se vzrůstem odebíraného výkonu. Z podnětu této nelogičnosti jsem nakreslil fázorový diagram (*obr. 5.3*) a tím došlo k odhalení chyby. Uvedený závěr lze využít ke kontrole správnosti připojení jednofázového odběru k trojfázové síti či k určení sledu fází.

Předmětem dalších diplomových prací by mohla být podrobnější analýza napěťových poměrů na venkovních vedeních při jednofázových odběrech či analýza harmonických vyšších řádů.

Bibliografické citace

- [1] JANSA, František. *Elektrická trakcia I*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1976.
- [2] KOŽUŠKO, Julius a kol. *Elektrická lokomotiva řady E499.2*. 1. vyd. Praha: NADAS, 1981.
- [3] MAJ, Jan a Jiří POHL. *Elektrické lokomotivy Siemens ES 64 U4* [online]. 2005 [cit. 2012-1-10]. Dostupné z: http://www.railvolution.net/czechraildays/2005/seminare/v_6.pdf.
- [4] ČSN EN 50160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. Třídící znak 330122.
- [5] ČSN EN 50163 ed. 2. *Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005. Třídící znak 333500.
- [6] JANSA, František. *Elektrická vozba a elektrické trakčné zariadenia na železniach*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1972.
- [7] LANÁKOVÁ, Gabriela a Dalibor ŠINDLER. *Nápajanie elektrických dráh*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989.
- [8] JANSA, František a Štěpán PELEŇSKÝ. *Napájení elektrických drah III*. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1982.
- [9] *150 let Olomoucko-pražské dráhy: Katalog lokomotiv*. Sestavil Miroslav Venclík, autoři fotografií Ondřej Řepka a Miroslav Venclík. [Praha?]: [b.j.], 1995.
- [10] RUSEK, Stanislav. *Teoretická elektroenergetika*. 1.vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-715-5.
- [11] SANTARIUS, Pavel. *Elektromagnetická kompatibilita*. Ostrava, 2007.
- [12] PNE 33 3430-3. *Parametry kvality elektrické energie, část 3: Nesymetrie napětí*. 2001.

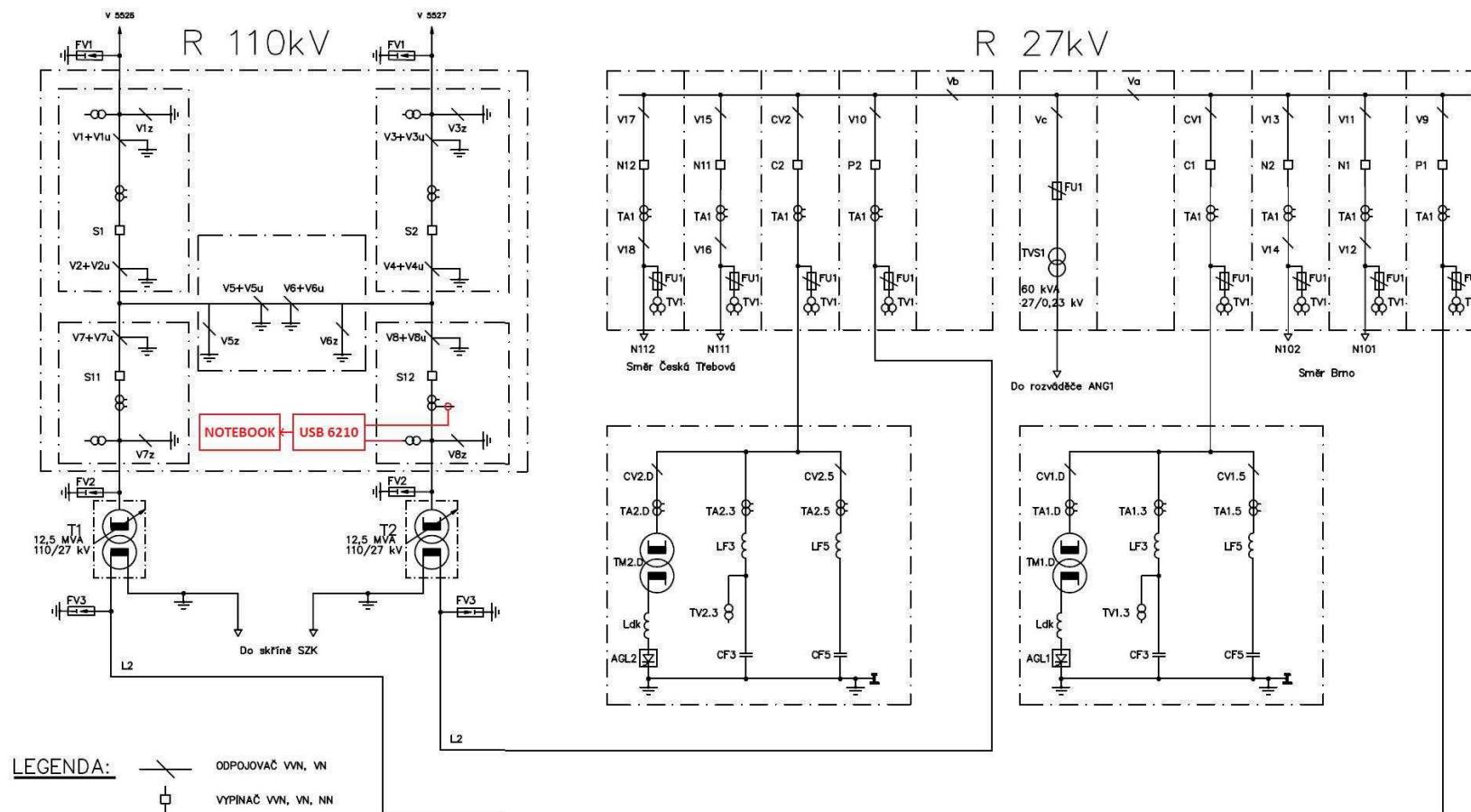
- [13] Provozovatelé distribučních soustav. *PPDS 2011: Příloha 3: Kvalita napětí v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení* [online]. 2011 [cit. 2012-2-6]. Dostupné z: http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2011/ppds-2011_priloha-3.pdf.
- [14] PALEČEK, Josef. *Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-78-791-0.
- [15] MATĚJKA, Jan. Nová technika při elektrizaci trati Brno – Česká Třebová. In: *Vědeckotechnický sborník Českých drah č.08/1999* [online]. 1999 [cit. 2012-3-15]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/802.pdf>.
- [16] Energetický regulační úřad. *Cenové rozhodnutí energetického regulačního úřadu č.5/2011* [online]. 2011 [cit. 2012-3-29]. Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%205_2011elektro.pdf.
- [17] KIJONKA, Jaromír a kol. *Teorie obvodů II* [CD-ROM]. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1489-6.
- [18] HLAVA, Karel a Václav BOČEK. Aktivita ČD v oblasti snižování nákladů na energii pro elektrickou trakci. In: *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 02/1996* [online]. 1996 [cit. 2012-3-15]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/207.pdf>.

Seznam příloh

- Příloha A** *Obrazová příloha:* Přehledové schéma trakční transformovny Blansko se zakresleným místem připojení měřicí aparatury
- Příloha B** *Grafická závislost:* Časový průběh desetiminutových hodnot napětí a odebíraného proudu na primární straně trakčního transformátoru
- Příloha C** *Grafická závislost:* Časový průběh desetiminutových hodnot odebíraného výkonu a činitele napěťové nesymetrie na primární straně trakčního transformátoru

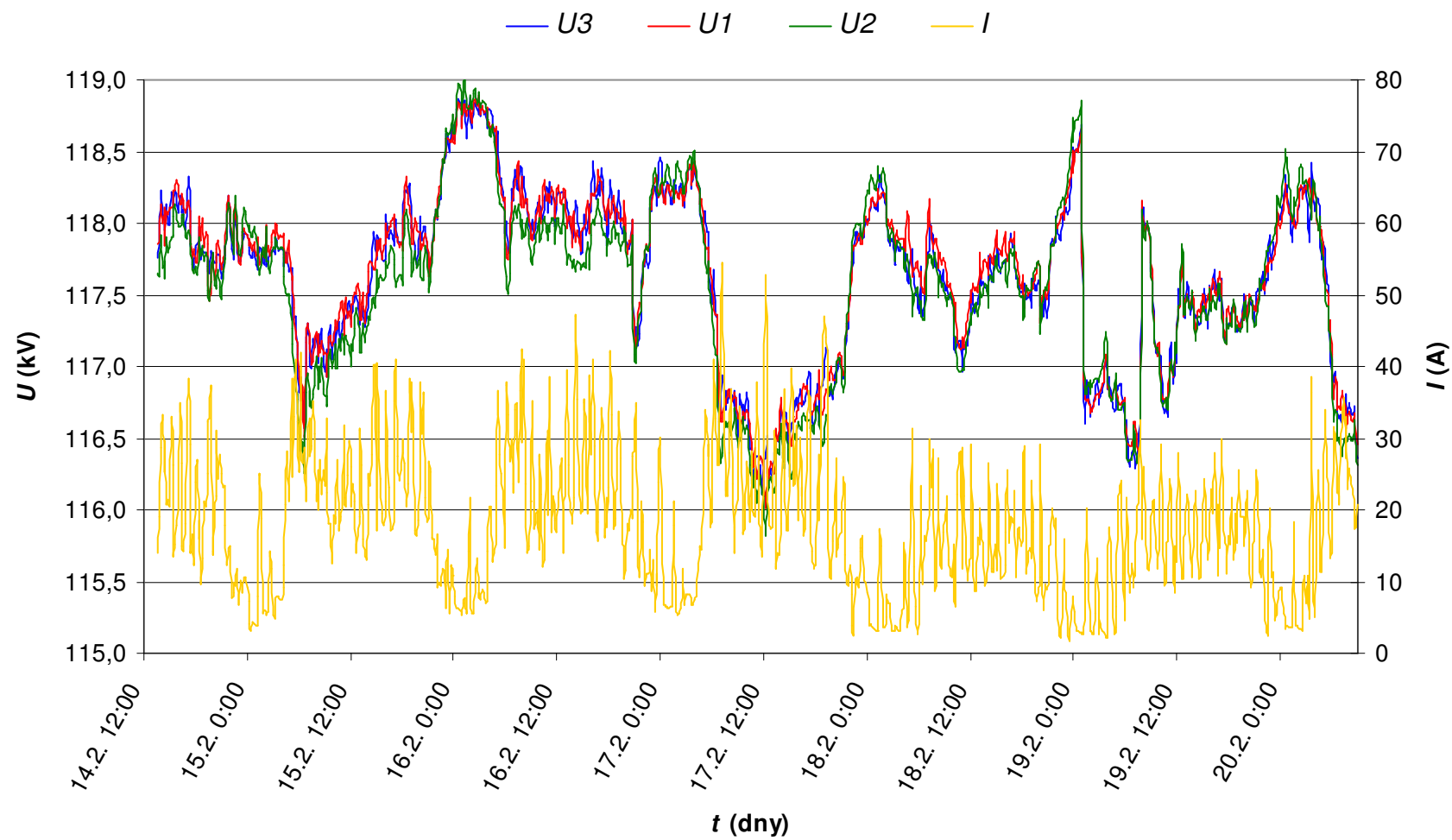
Příloha A

Obrazová příloha: Přehledové schéma trakční transformovny Blansko se zakresleným místem připojení měřící aparatury



Příloha B

Grafická závislost: Časový průběh desetiminutových hodnot napětí a odebíraného proudu na primární straně trakčního transformátoru



Příloha C

Grafická závislost: Časový průběh desetiminutových hodnot odebíraného výkonu a činitele napěťové nesymetrie na primární straně trakčního transformátoru

